

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA

TATIANE BORCHERS

PRIORIZAÇÃO OTIMIZADA DE REDES DE
TRANSPORTE PÚBLICO POR ÔNIBUS ATRAVÉS DE
ANÁLISE MULTICRITÉRIO E ALGORITMO GENÉTICO
EM ARARAQUARA - SP

São Carlos - SP

2021

TATIANE BORCHERS

PRIORIZAÇÃO OTIMIZADA DE REDES DE TRANSPORTE PÚBLICO POR ÔNIBUS
ATRAVÉS DE ANÁLISE MULTICRITÉRIO E ALGORITMO GENÉTICO EM ARARAQUARA -
SP

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Urbana.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Rochele Amorim Ribeiro

São Carlos

2021



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado da candidata Tatiane Borchers, realizada em 18/08/2021.

Comissão Julgadora:

Profa. Dra. Rochele Amorim Ribeiro (UFSCar)

Prof. Dr. Ricardo Augusto Souza Fernandes (UFSCar)

Profa. Dra. Ana Margarita Larrañaga Uriarte (UFRGS)

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana.

Ao meu avô Ernesto (*in memoriam*)

AGRADECIMENTOS

Soarei não tão formal aqui, peço licença para me fazer mais humana que acadêmica. Agradecer a construção dessa dissertação e a conclusão do mestrado, é agradecer a todos que compartilharam da vida comigo e me ajudaram a chegar aqui.

Agradeço primeiramente a mim mesma, por ter tido a persistência de concluir um mestrado em meio a uma pandemia e em um cenário de desmonte e descaso com a pesquisa brasileira.

Ao Victor, por ter sido a melhor companhia que eu pude encontrar no meio do caos. Obrigada por todos os artigos escritos juntos, por todas as revisões e correções, por abraçar minhas ideias, pela parceria na vida e por sonhar junto comigo.

À minha família, meus pais Ademir e Neiva, minha irmã Juliane, meus avós Ernesto (*in memoriam*) e Terezinha, por terem proporcionado todas as condições necessárias para que eu concluísse mais uma etapa da minha longa busca por conhecimento. Obrigada por apoiarem incondicionalmente minhas decisões.

À Elisa, por todos os anos de amizade, por todo o apoio e por todas as risadas. À Camila por todo o apoio, amizade e conforto nesses anos todos. Obrigada por me mostrarem que é possível estar perto mesmo se estando longe.

Novamente à Camila e também à Mari, pela ajuda durante as etapas de programação, principalmente por me manterem calma.

Ao Diego pela inspiração, pelas dicas acadêmicas, por ser meu lar quando eu volto e pela conexão que independe da frequência.

Ao Gustavo pela fluidez de sentimentos e pensamentos.

A todos os meus amigos, de agora e de sempre, que fazem a minha vida tão mais linda. Este trabalho tem um pedacinho de cada um de vocês.

Ao Murilo por fazer desse um processo mais fácil e saudável na medida do possível. Obrigada pelos puxões de orelha, pelos reforços positivos e por me ajudar a lidar com a vida.

À minha orientadora, Prof. Rochele, por me dar liberdade para pesquisar o tema que escolhi e por abraçar esse projeto. Obrigada por toda a dedicação, compreensão e incentivo durante o processo.

Aos demais professores do PPGEU por todo o conhecimento transmitido, em especial o Prof. Ricardo Augusto Souza Fernandes por sanar minhas dúvidas de otimização.

Aos meus colegas do PPGEU, que compartilharam comigo as alegrias e angústias da pós-graduação. Em especial ao Camilo, João, Leandro e Sandra, pelos trabalhos desenvolvidos em conjunto e pelos debates que mantivemos.

Ao Alex, secretário do PPGEU, por fazer toda a engrenagem girar. Obrigada pela dedicação, pela atenção e pelo carinho no trabalho.

À UFSCar pela infraestrutura disponível para realização da pesquisa e à CAPES pelo financiamento provido, salientando-se que o presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

“[...]”

*Nos abrieron el tejido
Y desangraron la aldea
Degollaron las palabras
Para matarnos la idea
Se pensaron inmortales
Hasta que llegó su día
Que el sol nos dio de su fuego
Y la mar su valentía
Se intimidan
Ellos se intimidan
Cuando llega ese momento
De ponerlos de rodillas
[...]*”

donde nadie más Respira, por Ileana Cabra e Ismael Cancel

“These people go out into the street, and walk down the street alone. They keep walking, and walk straight out of the city of Omelas, through the beautiful gates. They keep walking across the farmlands of Omelas. Each one goes alone, youth or girl, man or woman. Night falls; the traveler must pass down village streets, between the houses with yellow-lit windows, and on out into the darkness of the fields. Each alone, they go west or north, towards the mountains. They go on. They leave Omelas, they walk ahead into the darkness, and they do not come back. The place they go towards is a place even less imaginable to most of us than the city of happiness. I cannot describe it at all. It is possible that it does not exist. But they seem to know where they are going, the ones who walk away from Omelas.”

Ursula K. Le Guin

RESUMO

Priorizar modos de transporte público permite reduzir externalidades provocadas pelo intenso uso dos modos de transporte motorizados individuais e aumentar o bem-estar social da população. As faixas exclusivas são o modelo de priorização espacial mais simples, que permitem uma redução dos tempos de viagem, aumento da velocidade operacional dos ônibus, redução do consumo de combustível e a diminuição dos níveis de emissão de poluentes. A maioria dos estudos e projetos de implantação de sistemas de priorização de transporte público é realizada nos grandes centros urbanos. Entretanto, são as cidades médias os locais que apresentam maior crescimento populacional e em 2010 já concentravam cerca de um quarto da população brasileira. Essas cidades tem a oportunidade única de projetar sistemas de transporte público a tempo de evitar que os problemas observados nas grandes aglomerações urbanas cheguem até elas. Busca-se neste trabalho, desenvolver um modelo de tomada de decisão para o problema de projeto de rede de transporte público por ônibus, mais precisamente a determinação de vias prioritárias para implantação de corredores ou faixas exclusivas de ônibus. O escopo do trabalho são cidades médias brasileiras, com aplicação de um estudo de caso em Araraquara, uma cidade média no interior do estado de São Paulo, Brasil. O modelo proposto é composto pela combinação de dois métodos, uma análise multicritério através do AHP - *Analytic Hierarchy Process* (Processo Analítico Hierárquico) e um método de otimização com solução através de algoritmo genético. O primeiro, simplifica a rede de vias da cidade levando em consideração critérios socioeconômicos, de ocupação espacial e de infraestrutura e operação do sistema de transporte público existente; o segundo, fornece um conjunto de soluções possíveis para implantação das faixas exclusivas. Os resultados obtidos através do método AHP mostram que as vias selecionadas correspondem a eixos tradicionais de transporte na cidade e formam uma rede conectada, característica desejada em redes de transporte. Os resultados da otimização mostram uma redução dos tempos de viagem que varia de 9,45% ou 21,88 minutos, na menor rede resultante da otimização (17,87 km), a 23,61% ou 54,66 minutos, se considerada a rede mais extensa, composta por 44,64 quilômetros de faixas exclusivas. A combinação de ambos os métodos para o processo de tomada de decisão configura-se como uma das principais contribuições realizadas por este trabalho, além da ser uma das primeiras aplicações de um método de otimização com solução através de algoritmo genético em uma rede real de uma cidade brasileira.

Palavras-chave: Algoritmo Genético, Análise Multicritério, *Analytic Hierarchy Process*, Faixas Exclusivas de Ônibus, NSGA-II, Otimização, Transporte público.

ABSTRACT

Prioritizing public transport modes allows reducing externalities caused by the intense use of individual motorized transport modes and increasing the social welfare of the population. Exclusive bus lanes are the simplest spatial prioritization model, allowing a reduction in travel times, an increase in the operational speed of buses, a reduction in fuel consumption and a decrease in pollutant emission levels. Large urban centres are the object of most studies and projects for implementing public transport prioritisation systems. However, medium-sized cities have the fastest growing population and in 2010 they already concentrated about a quarter of the Brazilian population. These cities have the unique opportunity to design public transport systems in time to avoid that the problems observed in large urban agglomerations reach them. This paper seeks to develop a decision-making model for the design problem of public transport network by bus, more precisely the determination of priority roads for implementing bus corridors or exclusive bus lanes. The scope of the work is medium-sized Brazilian cities, with the application of a case study in Araraquara, a medium-sized city in the interior of the State of Sao Paulo, Brazil. The proposed model is composed of the combination of two methods, a multi-criteria analysis through AHP - Analytic Hierarchy Process, and an optimization method with solution through a genetic algorithm. The former simplifies the city's road network, considering socioeconomic criteria, land use, infrastructure and operation of the existing public transport system; the latter provides a set of solutions for implementing exclusive lanes. Results show that roads selected through the AHP method correspond to traditional transport axes in the city and form a connected network, a desired characteristic of transport networks. Optimization results show a significant reduction in travel times, ranging from 9.45% or 21.88 minutes, in the smallest network resulting from the optimization (17.87km) to 23.61% or 54.66 minutes, if the most extensive network, composed of 44.64 kilometres of exclusive lanes, is considered. The combination of both methods for the decision-making process is one of the major contributions of this work, besides being one of the first applications of an optimization method with solution through genetic algorithm in a real network of a Brazilian city.

Keywords: Analytic Hierarchy Process, Exclusive Bus Lanes, Genetic Algorithm, Multicriteria Analysis, NSGA-II, Optimization, Public transport.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipologia geral de sistemas de priorização de transporte público por ônibus	19
Figura 2 - Evolução histórica das publicações indexadas na base de dados Scopus.....	24
Figura 3 - Países com maior número de publicações indexadas na base de dados Scopus.....	24
Figura 4 - Visualização da rede das palavras-chaves para a busca " <i>bus lan*</i> " OR " <i>bus priority</i> " gerada no software VOSViewer	25
Figura 5 - Visualização da rede das palavras-chaves por ano (2010 – 2016) para a busca " <i>bus lan*</i> " OR " <i>bus priority</i> " gerada no software VOSViewer.....	26
Figura 6 – Nomenclatura de subproblemas de planejamento de transporte público, baseada nas definições de Ceder e Wilson (1986).....	33
Figura 7 - Etapas de trabalho da dissertação	41
Figura 8 – Critérios de avaliação selecionados para utilização no método AHP	43
Figura 9 – Aplicação do método AHP na calculadora raster do software QGIS	48
Figura 10 – Procedimento do NSGA-II	52
Figura 11 – Soluções não dominadas no espaço dos objetivos	54
Figura 12 – Cálculo da distância de multidão	55
Figura 13 – Procedimento de mutação de variáveis binárias	55
Figura 14 - Divisão modal do número anual de viagens nas cidades médias com 100 a 250 mil habitantes	60
Figura 15 - Divisão modal do número anual de viagens nas cidades médias com 250 a 500 mil habitantes	60
Figura 16 – Rede de tróleibus de Araraquara - SP	62
Figura 17 - Passageiros transportados no sistema de transporte público por ônibus em Araraquara anualmente no período de 2006 a 2019.....	63
Figura 18 – Frota de veículos e motocicletas de Araraquara no período de 2006 a 2019.....	64
Figura 19 – População residente estimada para 2020 nos setores censitários e nos loteamentos novos de Araraquara - SP	65
Figura 20 – Densidade habitacional (hab./ha) estimada para 2020 nos setores censitários e nos loteamentos novos de Araraquara - SP	66
Figura 21 – Mapa de zoneamento urbano de acordo com o Índice de Aproveitamento Máximo (I_{AM}) normalizado.....	67
Figura 22 – Mapa dos Polos Geradores de Tráfego de Araraquara - SP.....	68
Figura 23 – Vias arteriais e coletoras de Araraquara - SP	69
Figura 24 – Sistema de transporte público por ônibus de Araraquara - SP.....	70
Figura 25 – Sistema de transporte público por ônibus de Araraquara com itinerários base e atendimentos	71
Figura 26 - Fluxo médio de ônibus por via por hora durante o pico da manhã (6-9h).....	72
Figura 27 – Resultado do método AHP: áreas prioritárias para implantação de faixas exclusivas de ônibus em Araraquara - SP.....	74
Figura 28 – Vias candidatas para implantação de faixas exclusivas de ônibus em Araraquara - SP...	75
Figura 29 – Comparação da seleção de vias candidatas para implantação de faixas exclusivas de ônibus e a rede de tróleibus de Araraquara - SP	77
Figura 30 – Rede simplificada de Araraquara - SP para otimização.....	78
Figura 31 – Rede simplificada de Araraquara - SP para otimização com pontuação AHP de cada <i>link</i>	79
Figura 32 - Rede simplificada de Araraquara - SP para otimização com distância (em km) de cada <i>link</i>	80

Figura 33 - Indivíduos da geração 2000, fronteira de Pareto e demais fronteiras.....	81
Figura 34 - Vias selecionadas para implantação de faixas exclusivas – solução indivíduo A da geração 2000.....	84
Figura 35 - Vias selecionadas para implantação de faixas exclusivas – solução indivíduo B da geração 2000.....	85
Figura 36 - Vias selecionadas para implantação de faixas exclusivas – solução indivíduo C da geração 2000.....	86
Figura 37 - Vias selecionadas para implantação de faixas exclusivas – solução indivíduo D da geração 2000.....	87
Figura 38 - Vias selecionadas para implantação de faixas exclusivas – solução indivíduo E da geração 2000.....	88
Figura 39 – Mapa de percentual de seleção do <i>link</i> /logradouro nos indivíduos da fronteira de Pareto da geração 2000	89

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Níveis de planejamento de um sistema de ônibus	32
Quadro 2 - Escala de referência para comparação dos critérios	45
Quadro 3 – Grau de prioridade para os critérios “hierarquia viária” e “circulação de ônibus atualmente”	47
Quadro 4 – Classificação funcional viária de acordo com o Plano Diretor de Araraquara - SP.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Palavras-chave com maior número de ocorrências	26
Tabela 2 - Índice Randômico (IR) para o método AHP	46
Tabela 3 - Valores de referência para o indicador “quilômetros de vias dedicadas exclusivamente ao transporte público por 100.000 habitantes” (km / 100.000 habitantes).....	58
Tabela 4 – Pesos dos critérios do método AHP obtidos em entrevistas.....	73
Tabela 5 – Pesos utilizados e ordem de importância de cada critério no método AHP	73
Tabela 6 - Lista de vias candidatas à implantação de faixas exclusivas de ônibus em Araraquara - SP	76
Tabela 7 – Atributos dos indivíduos selecionados para especialização	82
Tabela 8 – ID, logradouro e percentual de seleção do <i>link</i> /logradouro nos indivíduos da fronteira de Pareto da geração 2000	90

LISTA DE SIGLAS

AHP - *Analytic Hierarchy Process* (Processo Analítico Hierárquico)

BLIPs - *Bus Lanes with Intermittent Priority* (Faixas exclusivas de ônibus com prioridade intermitente)

BRT - *Bus Rapid Transit* (Ônibus de trânsito rápido)

CR - Razão de Consistência do método AHP

CTA - Controladoria do Transporte de Araraquara

DOT - Desenvolvimento Orientado ao Transporte (do inglês *Transit-Oriented Development* - TOD)

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IBLs - *Intermittent Bus Lane* (Faixas exclusivas de ônibus intermitentes)

LRT - *Light Rail Transit* (Veículo Leve sobre Trilhos)

NSGA-II - *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II* (é um método de solução de problemas de otimização multiobjetivo, mas o nome do algoritmo geralmente não é traduzido para o português)

PGT - Polos Geradores de Tráfego

SIG - Sistema de Informação Geográfica

TNDP - *Transit Network Design Problem* (Problema de projeto de rede de transporte público)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1 Objetivos	19
1.1.1 Objetivo geral.....	19
1.1.2 Objetivos específicos.....	19
1.2 Justificativa	20
1.3 Hipóteses	21
1.4 Estrutura deste documento	21
2. REFERENCIAL TEÓRICO	23
2.1 Análise bibliométrica sobre priorização de transporte público por ônibus	23
2.2 Planejamento de transporte público	27
2.2.1 DOT - Desenvolvimento Orientado ao Transporte e sistemas BRT - <i>Bus Rapid Transit</i> ..	27
2.2.2 Panorama de pesquisas sobre planejamento de transporte público	29
2.2.3 Projeto de rede de transporte público - <i>Transit Network Design Problem</i>	31
2.3 Métodos para solução de problemas de projeto de rede de transporte público	34
2.3.1 Simplificação de redes de transporte.....	34
2.3.2 Análises multicritério	34
2.3.3 Métodos de otimização e algoritmos evolutivos	36
3. METODOLOGIA	41
3.1 Etapas de trabalho	41
3.2 Aplicação do método AHP.....	42
3.2.1 Seleção dos critérios de avaliação	43
3.2.2 AHP - <i>Analytic Hierarchy Process</i>	45
3.2.3 Normalização de dados referentes aos critérios	46
3.2.4 Ajustes em Sistemas de Informação Geográfica	48
3.3 Método de otimização	49
3.3.1 Modelo matemático.....	49
3.3.2 Algoritmo de solução	51
3.4 Construção da rede para otimização.....	56
3.5 Implementação do modelo de otimização na rede	56
3.6 Geoespacialização dos resultados	57
4. ESTUDO DE CASO	59
4.1 Cidades médias brasileiras	59
4.2 Estudo de caso: Araraquara – São Paulo.....	61
4.3 Mapas de critérios para aplicação do método AHP	64
4.3.1.1 População	64

4.3.1.2 Densidade	66
4.3.1.3 Índice de aproveitamento	66
4.3.1.4 Polos Geradores de Tráfego	67
4.3.1.5 Hierarquia viária.....	68
4.3.1.6 Rede de transporte público por ônibus	69
4.3.1.7 Fluxo de ônibus por via por hora	71
5. RESULTADOS.....	73
5.1 Resultado AHP.....	73
5.1.1 Matriz dos pesos dos critérios	73
5.1.2 Mapa de prioridade do método AHP.....	74
5.1.3 Rede simplificada - vias candidatas a receber implantação de faixas exclusivas	75
5.1.4 Considerações adicionais sobre a rede simplificada	76
5.2 Rede simplificada para método de otimização.....	78
5.3 Resultados do modelo de otimização – Fronteira de Pareto.....	80
5.4 Geoespacialização dos resultados	82
6. CONCLUSÕES	93
6.1 Considerações finais.....	93
6.2 Trabalhos futuros	95
REFERÊNCIAS	97
APÊNDICE A – Estimativa populacional em loteamentos e condomínios construídos após 2010 em Araraquara - SP	103
APÊNDICE B – Zoneamento urbano de Araraquara - SP	119
APÊNDICE C – Linhas de ônibus em operação em Araraquara - SP.....	123
APÊNDICE D – Rede para otimização de Araraquara - SP	125
APÊNDICE E – Fronteiras de Pareto do método otimização da rede de Araraquara - SP	129

1. INTRODUÇÃO

A maioria das cidades brasileiras teve seu desenvolvimento apoiado e orientado pelo uso do transporte motorizado individual, que provoca diversas externalidades negativas, tais como poluição sonora e atmosférica, congestionamentos e acidentes. Com o intuito de diminuir tais externalidades e melhorar a mobilidade urbana nas cidades brasileiras, a Política Nacional de Mobilidade Urbana, regulamentada pela Lei n. 12.587/2012, instituiu a prioridade de modos de transporte ativos e motorizados coletivos sobre os modos motorizados individuais. De maneira complementar, em 2015 o direito ao transporte foi acrescentado como um direito social no Art. 6º da Constituição Federal de 1988.

Além disso, o Brasil passou por um intenso processo de reorganização territorial a partir da década de 1970, momento em que as cidades médias passaram a apresentar um dinamismo maior e receber contingentes migratórios vindos das aglomerações metropolitanas. Esse processo foi mais intenso no interior de São Paulo, em uma espécie de “desconcentração concentrada”, com migração da Região Metropolitana de São Paulo para os municípios do interior equipados com mais infraestrutura (GOULART; TERCI; OTERO, 2013). Em 2010, os 245 municípios de porte médio no Brasil, abrigavam 25,46% da população nacional (IBGE, 2010c). Entretanto, quando se fala de mobilidade nesses centros urbanos, em 2015 apenas 8 municípios tinham projetos ou faixas exclusivas de ônibus em operação (NTU, 2015). Percebe-se então, a necessidade de pesquisar essas cidades e desenvolver soluções para as mesmas antes que estas enfrentem os problemas já observados nos grandes centros urbanos. A cidade selecionada como objeto deste estudo de caso é Araraquara - SP, pois apresenta um alto índice de motorização e nenhum projeto de priorização de transporte público por ônibus.

No tocante à priorização dos modos de transporte público por ônibus, é possível citar dois modos principais: baseados em tempo e baseados em espaço. Os principais fatores que provocam atraso dos ônibus são a interação e disputa de espaço viário com outros veículos, o tempo perdido em interseções semaforizadas e o tempo de embarque e desembarque nas paradas ou estações de ônibus. As soluções baseadas em tempo são compostas por um conjunto de tecnologias que visam reduzir o tempo de parada em interseções semaforizadas, estendendo o tempo de verde e reduzindo o de vermelho a fim de que os ônibus tenham prioridade nos cruzamentos. As soluções baseadas em espaço, foco deste estudo, segregam parte da via para o sistema de transporte público por ônibus (DADASHZADEH; ERGUN, 2018).

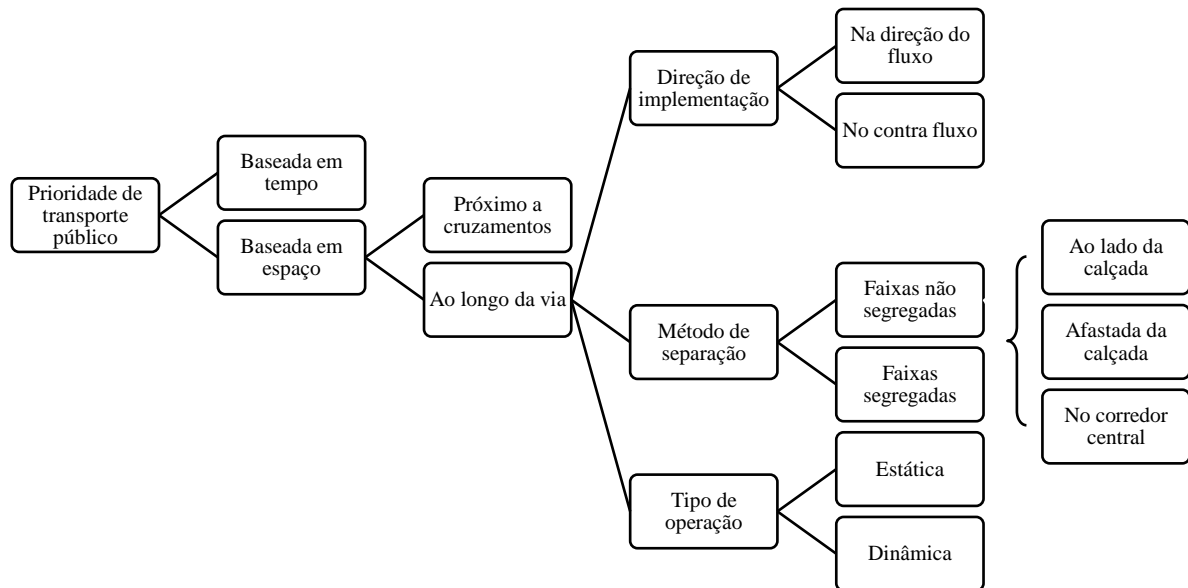
De acordo com a Associação Nacional das Empresas de Transportes por Ônibus (NTU, 2013), para a qualificação e priorização espacial de transporte público as principais intervenções físicas que podem ser implantadas são:

- A separação absoluta do fluxo de tráfego, com ausência de outros veículos motorizados que não os de transporte público;
- A separação física de tráfego, característica dos sistemas de BRT - *Bus Rapid Transit*;
- A separação parcial do fluxo de tráfego.

A separação parcial do fluxo de tráfego, categoria na qual as faixas exclusivas se enquadram, é um dos tipos de solução mais comuns no mundo todo. Iniciativas de implantação de faixas exclusivas no Brasil remontam às décadas de 1970 e 1980 com diversos casos de sucesso. Consideradas soluções de baixo custo financeiro, as faixas exclusivas eliminam ou reduzem a disputa dos ônibus por espaço viário, proporcionando maior fluidez na circulação viária destes, aumento de velocidade operacional, redução dos custos operacionais e melhoria dos serviços ofertados à população. Dado o curto prazo necessário para implantação e o atendimento imediato das expectativas da população, as faixas exclusivas se apresentam como uma interessante solução para a priorização do transporte público, contribuindo para melhoras significativas da circulação nas cidades e sendo uma solução para as externalidades originadas no transporte individual (NTU, 2013).

Há de se considerar ainda que existe um fator temporal na otimização completa do uso do espaço, ou seja, que a dedicação do espaço para priorização do transporte público por ônibus pode não ocorrer em período integral e deve ser realizada uma análise do fluxo existente para determinação da operação das faixas exclusivas. Portanto, em termos de operação, as faixas exclusivas podem ser divididas em estáticas – com funcionamento integral – e dinâmicas, com funcionamento intermitente em horários de pico ou com acionamento de equipamentos (DADASHZADEH; ERGUN, 2018). A tipologia geral de sistemas de priorização de transporte público por ônibus é apresentada na Figura 1.

Figura 1 – Tipologia geral de sistemas de priorização de transporte público por ônibus



Fonte: elaborado pela autora, adaptado de Dadashzadeh e Ergun (2018).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa é desenvolver um modelo de tomada de decisão para o problema de projeto de rede de transporte público por ônibus, mais precisamente a determinação de vias prioritárias para implantação de corredores ou faixas exclusivas de ônibus, através da combinação de uma análise multicritério e um método de otimização. O escopo deste trabalho são municípios brasileiros de médio porte, com um estudo de caso na cidade de Araraquara, no estado de São Paulo, Brasil.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Simplificar a rede de vias da cidade de Araraquara - SP através de análise multicritério (*Analytic Hierarchy Process* - Processo Analítico Hierárquico), possibilitando uma melhor tomada de decisão com o aprimoramento da rede;
- Desenvolver um modelo matemático para otimização de redes prioritárias de transporte público por ônibus;
- Implementar computacionalmente um método de otimização com solução através de algoritmo genético;

- Fornecer propostas de redes prioritárias de transporte público por ônibus através da espacialização em Sistemas de Informação Geográfica (SIG) dos resultados matemáticos do método de otimização;
- Analisar as soluções computacionais espacializadas, bem como apresentar uma discussão sobre a possibilidade de implantação das redes geradas no processo de otimização.

1.2 Justificativa

Sabendo que a infraestrutura e os sistemas de transportes possuem condição intrínseca e indissociável do ambiente construído, diversos estudos sobre essa relação vêm sendo conduzidos há décadas. Newman e Kenworthy (1996) associam os modelos de formação das cidades com o padrão de viagens gerado por eles, mostrando o efeito de uma cidade desconectada na geração de viagens individuais motorizadas. Atualmente, existe o apelo de se construir cidades mais acessíveis, sustentáveis e energeticamente eficientes. Para tal, os critérios para locação dos sistemas de priorização de transporte público devem levar em consideração o ambiente, buscando locais onde será possível aumentar a captação de demanda, o que ocorrerá em locais com maiores densidades e/ou próximos a pontos geradores e atratores de viagens (CERVERO; DAI, 2014; NEWMAN; KENWORTHY, 1996).

Segundo dados do relatório Prioridade ao Transporte Público por Ônibus (NTU, 2015), 34 cidades brasileiras possuíam projetos ou faixas exclusivas de ônibus em operação em 2015. Nota-se, portanto, que é praticamente inexistente a implantação de faixas exclusivas a nível nacional, e ainda mais reduzido é o número de cidades de até 500 mil habitantes nessa lista: apenas oito. Dado que o cenário nacional é bastante deficitário, cabe o questionamento de porque esse estudo foca nas cidades médias brasileiras e em particular no município de Araraquara - SP, Brasil. Pois bem, fatores como a escassez de recursos e a demanda por transporte público provavelmente não justificarão a implantação de um sistema BRT completo, mas ainda assim se faz necessário priorizar o transporte público nesses municípios. Estas cidades configuram um nicho a ser estudado, dado o histórico de desenvolvimento urbano brasileiro e as expectativas de crescimento que serão comentados no capítulo 4. Ainda, observando os impactos gerados em grandes centros urbanos como um horizonte a ser evitado, a priorização dos sistemas de transporte público pode configurar uma das soluções mais eficazes a ser adotada como política preventiva.

1.3 Hipóteses

As hipóteses deste estudo estão definidas da seguinte maneira:

- A redução dos tempos de viagem dos passageiros obtida com a otimização de uma rede prioritária de transporte público de Araraquara - SP viabiliza e justifica a implantação de faixas exclusivas de ônibus.
- De acordo com a literatura, espera-se que as faixas exclusivas de ônibus deverão ser implantadas próximas a áreas urbanas consolidadas e com alta densidade populacional e/ou nas vias arteriais da cidade. Entretanto, os estudos que apresentam essas características geralmente se concentram em grandes centros urbanos. Tal premissa pode não ser válida para cidades de porte médio, onde outros fatores podem se destacar em relação aos supracitados.

1.4 Estrutura deste documento

Este documento é dividido em 6 capítulos, sendo: 1) introdução e apresentação de objetivos, justificativa, hipóteses e estrutura; 2) referencial teórico sobre priorização de transporte público por ônibus e metodologias utilizadas; 3) etapas de trabalho e a metodologia aplicada; 4) definições do estudo de caso; 5) resultados; e 6) discussão, conclusões e apontamentos para estudos futuros.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo será apresentado o referencial teórico utilizado para o desenvolvimento deste trabalho, composto por uma análise bibliométrica, uma revisão bibliográfica sobre planejamento de transporte público por ônibus e, por fim, uma análise de métodos utilizados para selecionar vias prioritárias e otimizar redes de transporte.

2.1 Análise bibliométrica sobre priorização de transporte público por ônibus

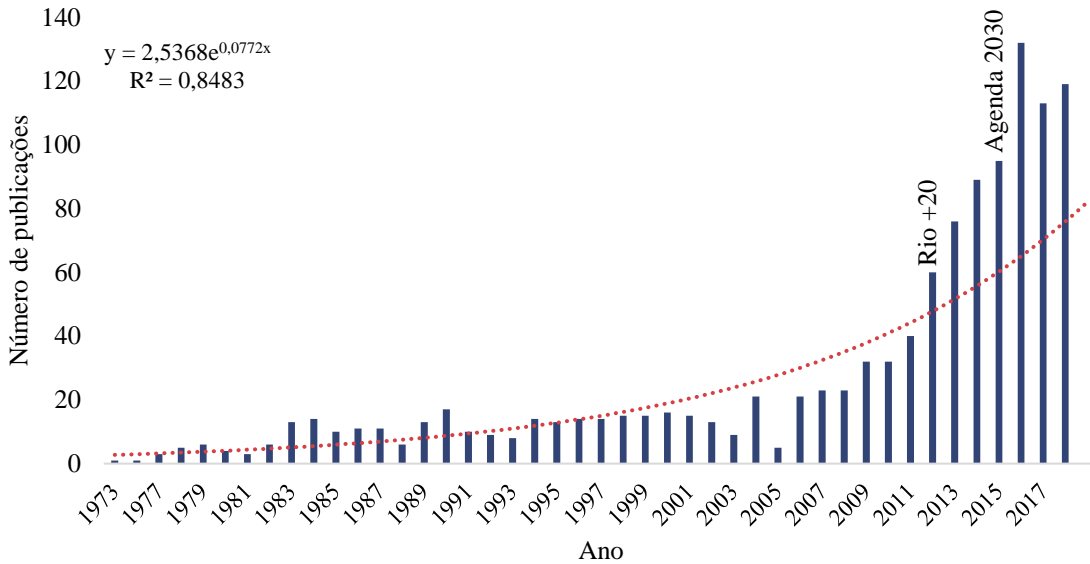
A bibliometria possibilita a observação do estado do tema de pesquisa e de um determinado campo da ciência por meio de análise da produção científica indexada em um repositório de dados. Através de análises bibliométricas, é possível identificar tendências de produção de conhecimento em determinada área, evolução histórica, além de autores, instituições e periódicos relevantes para a inserção das pesquisas (SOARES *et al.*, 2016). Os procedimentos de busca e compilação de dados estão descritos em Borchers e Ribeiro (2019). Os resultados são brevemente apresentados a seguir.

A busca com os termos "*bus lan**" OR "*bus priority*" resultou em 1.265 artigos, com 2.473 autores e um conjunto de 2.556 palavras-chave relacionadas. A evolução histórica (Figura 2) mostra que houve um aumento significativo na quantidade de publicações a partir de 2009. Foram publicados 32 estudos naquele ano, volume que quadruplicou no pico atingido em 2016 com 132 publicações. Nos anos de 2017 e 2018 houve ligeira queda, com 113 e 119 publicações, respectivamente. A curva de tendência mostra que era esperado um aumento no número de publicações, entretanto, desse 2012 a quantidade de publicações ultrapassa essa curva, fenômeno que pode ser explicado por eventos e publicações globais focados em desenvolvimento sustentável e mudanças climáticas, tais como o Rio +20 e a Agenda 2030. A curva tem um coeficiente de determinação R^2 de 0,8483, que revela uma certa oscilação na quantidade de publicações anuais. Apesar de ser uma área em crescimento, o R^2 mostra que não necessariamente o número de publicações de um ano sempre supera o número dos anos anteriores.

A Figura 3 mostra os países com maior número de publicações. Os cinco países com mais documentos publicados são os Estados Unidos, a China, o Reino Unido, a Austrália e a Índia. É possível tirar proveito das experiências internacionais já consolidadas e aplicá-las ao cenário nacional, uma vez que o Brasil aparece na vigésima posição com 15 documentos publicados, ou seja, ainda é incipiente como produtor das pesquisas sobre o tema que estão

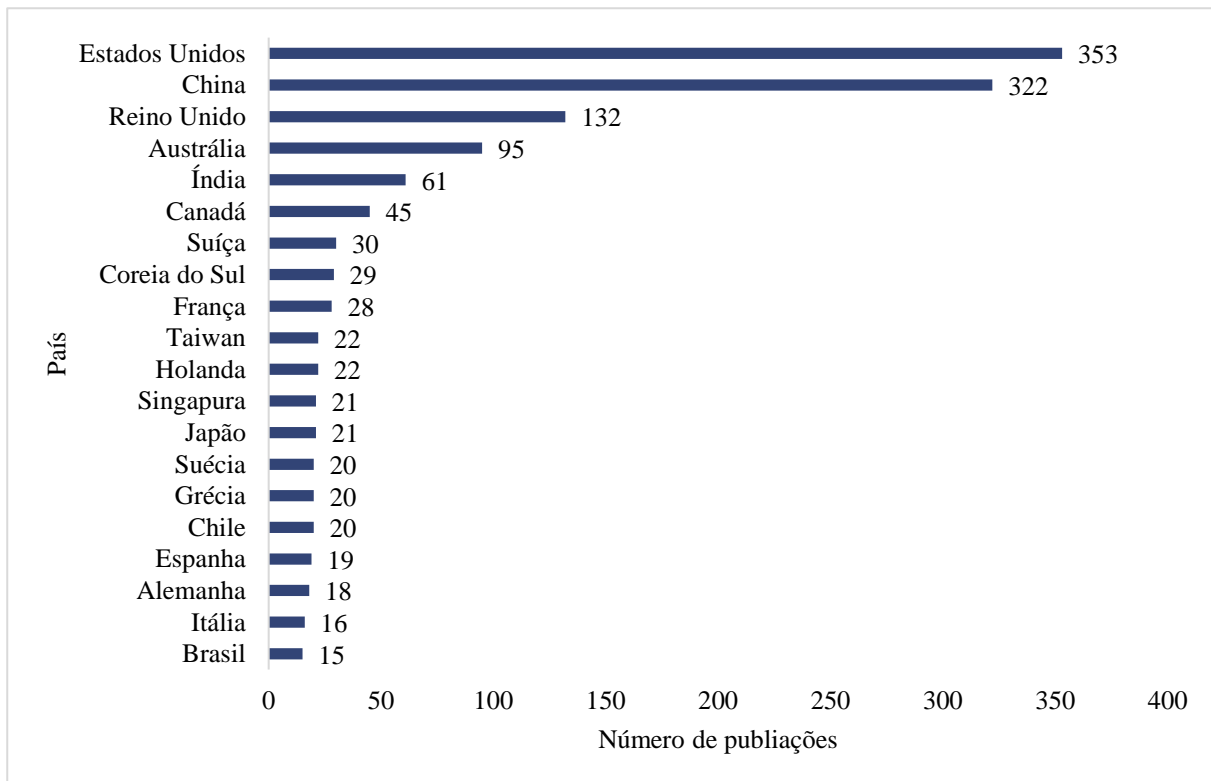
incorporadas na base de dados analisada e que as iniciativas de implantação de faixas exclusivas são escassas.

Figura 2 - Evolução histórica das publicações indexadas na base de dados Scopus



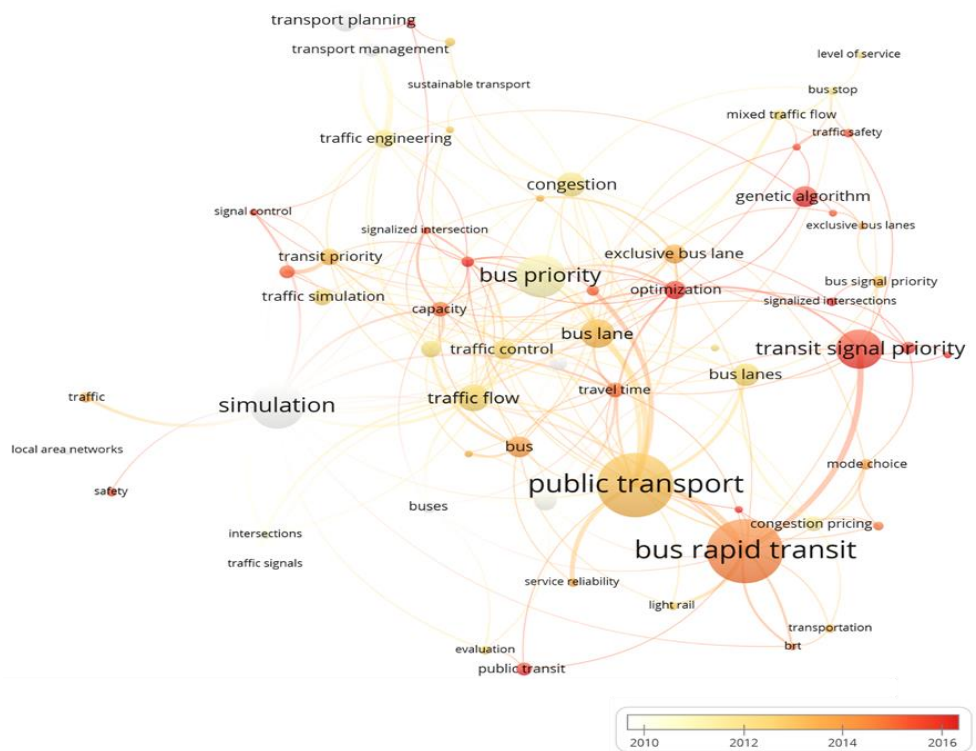
Fonte: adaptado de Borchers e Ribeiro (2019).

Figura 3 - Países com maior número de publicações indexadas na base de dados Scopus



Fonte: adaptado de Borchers e Ribeiro (2019).

Figura 5 - Visualização da rede das palavras-chave por ano (2010 – 2016) para a busca "bus lan*" OR "bus priority" gerada no software VOSViewer



Fonte: elaborado pela autora (2019).

Tabela 1 - Palavras-chave com maior número de ocorrências

Termo em inglês	Equivalência do termo em português	Ocorrências
<i>Public transport</i>	Transporte público	42
<i>Bus Rapid Transit</i>	<i>Bus Rapid Transit</i> – Sistemas de ônibus rápido	42
<i>Simulation</i>	Simulação	30
<i>Bus priority</i>	Prioridade por ônibus	28
<i>Transit signal priority</i>	Prioridade de sinais de transporte público	26
<i>Bus lane</i>	Faixa de ônibus	19
<i>Traffic flow</i>	Fluxo de tráfego	18
<i>Congestion</i>	Congestionamento	16
<i>Bus lanes</i>	Faixas de ônibus	15
<i>Transport planning</i>	Planejamento de transportes	15
<i>Bus</i>	Ônibus	14
<i>Genetic Algorithm</i>	Algoritmo genético	14
<i>Public transportation</i>	Transporte público	13
<i>Traffic control</i>	Controle de tráfego	13
<i>Exclusive bus lane</i>	Faixas de ônibus exclusivas	13

Fonte: Borchers e Ribeiro (2019).

A seguir, serão discutidos alguns termos retornados na busca, começando por uma contextualização de planejamento de transportes e sistemas BRT, seguido de um panorama dos principais trabalhos encontrados na busca na base de dados SCOPUS e uma conceituação de

projetos de rede de transporte público. Por fim, são apresentadas pesquisas sobre os métodos de resolução para o problema proposto.

2.2 Planejamento de transporte público

2.2.1 DOT - Desenvolvimento Orientado ao Transporte e sistemas BRT - *Bus Rapid Transit*

Os congestionamentos e as demais externalidades já apontadas, produzidas pelo crescente uso de veículos motorizados individuais, mostram a necessidade de repensar o planejamento urbano e dos sistemas de transportes. A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável da Organização das Nações Unidas, no item 11.2 do objetivo 11 que trata de cidades e comunidades sustentáveis, declara:

“Até 2030, proporcionar o acesso a sistemas de transporte seguros, acessíveis, sustentáveis e a preço acessível para todos, melhorando a segurança rodoviária por meio da expansão dos transportes públicos, com especial atenção para as necessidades das pessoas em situação de vulnerabilidade, mulheres, crianças, pessoas com deficiência e idosos.” (ONU, 2015).

O termo Desenvolvimento Orientado ao Transporte - DOT (do inglês *Transit-Oriented Development* – TOD) designa o processo de construção de casas, empregos, locais públicos ou de prestação de serviços próximo a estações de transporte público, que por sua vez, estão localizadas em eixos estruturadores de transporte dentro da cidade (CERVERO, 1998). Este modelo busca reorientar as políticas e estratégias de planejamento urbano, com a construção de bairros compactos, de alta densidade e diversidade de uso, com espaços públicos de qualidade que estimulam a interação social. De maneira geral, a literatura distingue dois níveis de planejamento: i) no nível local, o modelo estimula as viagens ativas, priorizando a escala humana nas construções, calçadas caminháveis e itinerários cicloviários; ii) no nível da cidade, recomenda o transporte público coletivo, sobre trilhos ou rodas, para conectar os diversos bairros, ligando os pontos de serviços, comércio, empregos e moradia e reduzindo conseqüentemente a dependência do automóvel (EMBARQ BRASIL, 2015; SUZUKI; CERVERO; IUCHI, 2013). Concentrar o crescimento ao longo de corredores permite a contenção do espraiamento urbano, contribuindo para reduzir os impactos da urbanização nas mudanças climáticas e ao mesmo tempo aumentando a mobilidade de classes mais pobres (CERVERO; DAI, 2014).

Em muitos países em desenvolvimento, a implantação de sistemas férreos se torna inviável dados os custos de construção e, portanto, os sistemas de priorização de transporte por ônibus se apresentam como uma alternativa cujo custo-benefício é mais atrativa. Os investimentos para sistemas BRT são estimados em 1/10 dos sistemas de metrô, enquanto que sistemas de ônibus custam cerca de 1/10 de BRTs (DAGANZO, 2010). Tais sistemas também permitem o desenvolvimento em eixos estruturadores, mantendo características como conforto, rapidez e operação frequente (CERVERO; DAI, 2014). É possível distinguir dentre os sistemas de priorização de ônibus, os de:

- Alta capacidade, conhecidos como *Bus Rapid Transit* – BRT, que possuem algumas características marcantes como segregação total do fluxo de outros veículos, cobrança antes do embarque e embarque/desembarque em nível;
- Baixa capacidade, com operação dos veículos em faixas dedicadas, geralmente do lado direito da via, conhecidos como BRT-*light* (BRASIL, 2008; CERVERO; DAI, 2014).

Daganzo (2010) afirma que caso uma cidade possua vias elegíveis suficientes para operar um sistema de ônibus ou BRT, estes podem superar o atendimento oferecido por um sistema de metrô, mesmo que a cidade seja grande e a demanda alta. Destaca-se que sistemas segregados resultam em atendimento a demandas maiores, mas os investimentos são mais altos e é preciso fazer uma análise detalhada para determinar qual sistema é o mais indicado para cada caso.

Um outro ponto que é levantado por Goh et al. (2014) é sobre o desempenho da segurança viária e os acidentes com ônibus. Os autores realizaram um estudo de caso nas vias de Melbourne, Austrália, onde medidas prioritárias de ônibus foram aplicadas, e os resultados obtidos por eles revelaram uma redução significativa na proporção de acidentes envolvendo ônibus que atingem objetos e veículos estacionados, o que sugere um efeito positivo da prioridade viária na capacidade de manobra dos ônibus. Entretanto, embora os resultados deste estudo indiquem que há um impacto positivo na segurança viária no nível macro, pode haver potencialmente uma mistura de impactos na segurança (positivos e negativos) no nível micro. A introdução de uma faixa de ônibus exclusiva, por exemplo, provavelmente levará a reduções de acidentes dentro e fora da via, uma vez que ela pode atuar como um amortecedor e, assim, reduzir as colisões entre carros na via. A probabilidade de colisões traseiras envolvendo ônibus também diminuirá quando forem implementados esquemas de prioridade de ônibus que envolvam a segregação de ônibus do tráfego principal. No entanto, possíveis impactos negativos podem surgir em cruzamentos, pois os ônibus podem ter que lidar com carros que

entram e saem das faixas de ônibus para acessar vias e garagens de veículos. Ainda, se não houver atenção às faixas de pedestre, os riscos de acidentes relacionados a pedestres também podem aumentar devido à maior distância de travessia. É necessário, portanto, um planejamento e implantação adequados desses sistemas, de modo a potencializar os efeitos positivos e minimizar os negativos.

Como existem diversos aspectos envolvidos no planejamento de uma rede de transporte público, desde infraestrutura até operação, existem diferentes abordagens de resolução das etapas de planejamento, algumas das quais são apresentadas a seguir.

2.2.2 Panorama de pesquisas sobre planejamento de transporte público

O espaço viário está em constante conflito e se faz necessário entender não só o uso do espaço, mas como ele pode ser gerenciado para melhorar a acessibilidade para todos. Durante vários anos, planejadores de transporte consideraram um ônibus apenas um “automóvel” maior, equivalente a 2,5 vezes um automóvel normal. Acreditava-se então que se a engenharia de tráfego fizesse o trânsito em geral fluir, os ônibus também se beneficiariam. No passado, com níveis de congestionamento toleráveis, talvez essa hipótese fosse verdadeira. Atualmente, entretanto, é consenso entre os pesquisadores da área que o transporte público deve ser tratado como prioridade (ANTP, 2019).

A fim apresentar um breve panorama das estratégias pesquisadas e implantadas em relação a priorização de modos de transporte público, foram analisados os principais resultados da busca com os termos "*bus priority*" OR "*bus lan**" na base de dados SCOPUS descrita no item 2.1. A resolução dos problemas de mobilidade engloba muitas etapas e possui diferentes abordagens. Entre as principais estratégias encontradas na análise bibliométrica estão a alocação do espaço viário e projeto de rede, programação semafórica, implementações tecnológicas e pedágio urbano, este último geralmente associado a alguma outra estratégia. A seguir serão apresentadas algumas pesquisas relacionadas ao escopo desse estudo, que é alocação prioritária do espaço viário e projeto de rede, e como seus resultados contribuem para este trabalho.

Um dos problemas iniciais é como provar a necessidade da priorização do transporte público e garantir o espaço viário necessário para os ônibus, evitando o conflito com veículos individuais. Zheng e Geroliminis (2013) apresentam um modelo na escala de cidade que inclui interação dos modos de transporte público e individual para alocar da melhor maneira possível o espaço viário. O objetivo do problema proposto pelos autores é minimizar o tempo total de

viagem dos passageiros. As simulações neste trabalho foram realizadas para comparar o desempenho da alocação estática (funcionamento em período integral) com a alocação dinâmica (funcionamento apenas em determinados períodos do dia) do espaço exclusivo para ônibus, além de um cenário teste com alocação dinâmica associada a pedágio urbano. Os autores concluem que a alocação dinâmica de espaço viário, ou seja, faixas exclusivas funcionando em alguns períodos do dia, minimiza os tempos de viagem de maneira mais eficiente porque utiliza melhor o espaço das faixas exclusivas durante os horários de não-pico. Ao implementar pedágio urbano durante o período de pico, houve uma troca de modo, aumentando a ocupação dos ônibus e reduzindo ainda mais os tempos de viagem.

Quando já existe segregação viária para o transporte coletivo por ônibus, há diversos estudos sobre como operar essa segregação. Dadashzadeh e Ergun (2018) detalham diversos tipos de prioridade, entre eles: i) faixas exclusivas próximas a interseções; ii) faixas de ônibus totalmente segregadas, como BRTs e LRTs; iii) faixas de ônibus parcialmente segregadas, geralmente localizadas na faixa direita da via. Ainda, citam que as faixas podem ser operadas de modo intermitente, as chamadas IBLs (*Intermittent Bus Lane*) e as BLIPs (*Bus Lanes with Intermittent Priority*). Viegas e Lu (2004) denominam de IBL uma faixa na qual o status de uma determinada seção muda de acordo com a presença ou não de um ônibus em seu domínio espacial: quando um ônibus está se aproximando de uma seção, o status dessa faixa é alterado para a faixa exclusiva e depois que o ônibus sai da seção, torna-se uma faixa normal novamente, aberta ao tráfego geral. As BLIPs são definidas por Eichler e Daganzo (2006) como um conjunto de seções espaciais onde os ônibus trafegam de maneira exclusiva na via e concluem que as BLIPs, diferentemente das dedicadas, não reduzem significativamente a capacidade da via. A intermitência, no entanto, aumenta a densidade média de tráfego e, como resultado, aumenta atrasos; estes, porém, são mais do que compensados pelos benefícios para os passageiros de ônibus. Entretanto, os autores salientam que as BLIPs não se destinam a vias próximas ou acima da capacidade de tráfego.

Em síntese, para que os sistemas de transporte público sejam competitivos com o automóvel, eles devem fornecer um bom serviço em todos os lugares da cidade o tempo todo, bem como serem facilmente compreendidos pelos passageiros. Para que isso aconteça, esses sistemas não devem ser projetados como um corredor isolado e descontínuo e sim como redes bidimensionais completas (DAGANZO, 2010; ESTRADA et al., 2011). Chen et al. (2009) analisaram diversos fatores que refletem na confiabilidade dos sistemas de ônibus. O estudo de caso na cidade de Beijing mostrou que a oferta de uma faixa de ônibus exclusiva desempenha um papel significativo na melhoria da confiabilidade do serviço e recomendam tratamentos

preferenciais de ônibus, como implantar mais faixas de ônibus exclusivas, estender o horário de operação das existentes e implementar a prioridade semaforica em mais rotas. Basso et al. (2011) criaram um modelo teórico para analisar qual medida política é mais eficiente: pedágio urbano, subsídios para o transporte público e criação de faixas exclusivas de ônibus. Os resultados obtidos pelos autores mostram que o maior ganho em bem-estar social é com implantação de faixas exclusivas. Esse aumento do bem-estar social é potencializado com a associação das faixas e da cobrança de pedágio urbano, mas os autores ressaltam que as faixas provavelmente terão apoio político, enquanto o pedágio encontrará oposição e resistência. Independente de qual abordagem é adotada, um sistema de ônibus deve prover aos passageiros confiabilidade, disponibilidade de informações, conforto, segurança pública e contra acidentes (CURRIE; WALLIS, 2008; NIELSEN et al., 2005).

Se confrontados com congestionamentos, problemas de estacionamento urbano e o aumento da poluição, usuários de veículos individuais podem considerar a possibilidade de mudar para o transporte público se tiverem um sistema acessível e de boa qualidade (GUIHAIRE; HAO, 2008). De maneira consistente, diversos autores, através de metodologias diferentes chegaram à conclusão de que a implantação de sistemas prioritários de transporte público beneficia a população e reduz as externalidades provocadas pelos automóveis.

2.2.3 Projeto de rede de transporte público - *Transit Network Design Problem*

De acordo com Céder e Wilson (1986), o processo de planejamento de sistemas de transporte público pode ser dividido em cinco etapas, conforme apresentado no Quadro 1. De maneira ideal, todos os níveis deveriam ser tratados simultaneamente durante o planejamento, mas devido à complexidade envolvida isto se torna impraticável. Surgem, portanto, diversos subproblemas, analisados de diferentes maneiras na literatura (GUIHAIRE; HAO, 2008). Este estudo se restringe ao Nível A de planejamento e está relacionado com estratégias de operação e análise das rotas, que aqui não representam as linhas de ônibus e sim as rotas de prioridade de transporte público na malha viária do município.

Quadro 1 - Níveis de planejamento de um sistema de ônibus

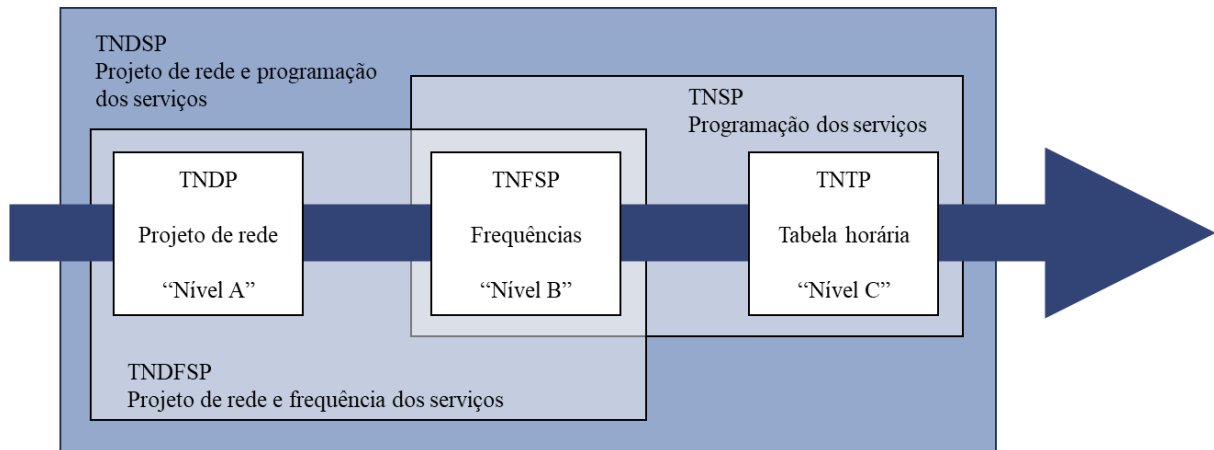
Entradas independentes	Atividade de planejamento	Saída
Dados de demanda Dados de oferta Índices de performance das rotas	Nível A - Design da rede	Alterações de rota Novas rotas Estratégias de operação
Subsídio disponível Frota disponível Políticas de atendimento Operação atual	Nível B - Determinando frequências	Frequência dos serviços
Demanda por hora do dia Horários da primeira e última viagens Tempos de viagem	Nível C - Desenvolvimento de tabela horária de viagens	Horário de partida das viagens Horário de chegada das viagens
Tempo ocioso/espera Tempo de retorno Restrições de cronograma Estrutura de custos	Nível D - Programação do cronograma dos ônibus	Alocação da frota
Regras de trabalho Estrutura de custo operacional	Nível E - Alocação da mão de obra	Alocação da mão de obra

Fonte: Ceder e Wilson (1986).

Os artigos mais relevantes contendo revisões sobre o tema, disponíveis na base de dados SCOPUS, são: i) *Transit network design and scheduling: a global review*, de Guihaire e Hao (2008), no qual os autores buscam fornecer ao leitor uma visão ampla e completa do campo dos problemas de projeto de rede e frequência dos serviços e analisam métodos de solução; ii) *Transit Route Network Design Problem: Review*, de Kepaptsoglou e Karlaftis (2009), onde é feita uma revisão sistemática do problema de projeto de rede de rotas de transporte público baseada em três partes: objetivos, parâmetros de operação e métodos de solução; iii) *A review of urban transportation network design problems*, de Farahani et al. (2013), onde os autores buscam fornecer uma visão mais ampla dos problemas de projeto de rede de transporte urbano, buscando permitir comparações de abordagens de formulação e métodos de solução. Estes três trabalhos definem as nomenclaturas e escopo dos problemas, os principais dados e métodos para resolução, e servem de base para as premissas deste estudo.

Guihaire e Hao (2008) realizaram uma revisão de todos os trabalhos relacionados com os níveis A (planejamento estratégico), B e C (planejamento tático). Os autores denominaram os subproblemas da união de níveis de planejamento propostos por Ceder e Wilson (1986), conforme Figura 6. Conforme mencionado anteriormente, este estudo se restringe ao nível A de planejamento e o problema aqui tratado é o *Transit Network Design Problem* (TNDP), que em português é denominado Problema de Projeto de Rede de Transporte Público. Ambos os termos são utilizados aqui como sinônimos e muitas vezes, apenas a sigla TNDP é mencionada.

Figura 6 – Nomenclatura de subproblemas de planejamento de transporte público, baseada nas definições de Ceder e Wilson (1986)



Fonte: elaborado pela autora, adaptado de Guihaire e Hao (2008).

Segundo as definições encontradas na literatura, um TNDP consiste em determinar um conjunto de rotas, cada uma sendo formada por dois terminais e uma sequência de pontos de ônibus intermediários, dada a distribuição da demanda de viagem, as características de topologia de uma área e um conjunto de objetivos e restrições (FARAHANI et al., 2013; GUIHAIRE; HAO, 2008). De acordo com Kepaptsoglou e Karlaftis (2009), a formulação do problema pode ser realizada em três seções principais: i) objetivos, sendo a formulação com um objetivo simples ou multiobjetivo; ii) parâmetros, relacionados às variáveis de decisão (rotas, frequências, ...), características da rede ou da demanda; e iii) métodos de solução, seguindo abordagens convencionais como métodos analíticos e de programação matemática ou heurísticas.

Os dados de entrada necessários para o problema segundo Guihaire e Hao (2008) são a topologia e a matriz origem destino. Farahani et al. (2013) citam a infraestrutura da rede disponível e a demanda estimada das viagens, mas salientam que dependendo das possibilidades de combinação dos subproblemas, o orçamento disponível, a capacidade dos ônibus, o número máximo de linhas e outros dados podem ser necessários.

O planejamento de transporte público é um problema extremamente complexo e difícil, mesmo quando estudados apenas os subproblemas apontados por Guihaire e Hao (2008). Como métodos de solução para esses problemas, alguns autores utilizam programação linear e algumas formas de programação inteira e inteira-mista, porém essa prática permite pouca flexibilidade e geralmente é restrita a situações baseadas em várias suposições simplificadoras (GUIHAIRE; HAO, 2008). Justamente devido à complexidade, tem sido cada vez mais frequente o uso de abordagens heurísticas ou metaheurísticas como métodos de solução para o

TNDP (FARAHANI et al., 2013; GUIHAIRE; HAO, 2008; KEPAPTSOGLOU; KARLAFTIS, 2009).

2.3 Métodos para solução de problemas de projeto de rede de transporte público

2.3.1 Simplificação de redes de transporte

Devido à dificuldade de processamento computacional de uma rede complexa composta de muitos segmentos (*links*) e nós como são as redes de transporte de uma cidade, algumas simplificações são necessárias. Uma das estratégias para essa simplificação é a criação de estruturas denominadas grafos, formadas por dois subconjuntos: um de objetos chamados vértices e um de objetos chamados arcos ou *links*; cada arco está associado a dois vértices, um inicial e outro final (BONDY; MURTY, 1976). Mauttone e Urquhart (2009) simplificaram a rede de Rivera, Uruguai, criando um grafo onde os vértices representam zonas da cidade, criadas de acordo com um determinado critério de agregação, e os arcos são conexões lógicas entre os vértices; as rotas foram representadas como sequências de zonas.

Yu et al. (2015) selecionam vias candidatas para implantação de faixas exclusivas em Dalian, China, através de alto fluxo de ônibus na via, além de características como ter circulação em mão dupla e no mínimo quatro faixas disponíveis. Outra possibilidade de simplificação é a geração de rotas usando algoritmos do tipo *shortest-path* (o problema do caminho mais curto consiste em encontrar o melhor caminho entre dois nós) que adicionam nós ou *links* à rota ligando os pontos de maior demanda, até que algum tipo de restrição definida para a duração da rota, tempo de viagem ou etc. seja violada (FARAHANI et al., 2013; KEPAPTSOGLOU; KARLAFTIS, 2009). As próprias rotas podem passar por um processo de otimização ou então as vias que compõem as rotas são selecionadas para compor um grafo.

A rede viária do estudo de caso deste trabalho foi simplificada através de uma análise multicritério, por dois motivos principais. O primeiro foi a indisponibilidade de dados de origem e destino de viagens e o segundo, a possibilidade de inserir características socioeconômicas na tomada de decisão, não apenas fatores relacionados a rede de transporte existente, embora estes também sejam considerados.

2.3.2 Análises multicritério

Os critérios para locação das faixas exclusivas levam em consideração o ambiente construído. A literatura mostra que os principais critérios para localização de faixas exclusivas

estão relacionados com a possibilidade de aumento de captação de demanda para o sistema, que ocorre em locais com maiores densidades e/ou próximos a pontos geradores e atratores de viagens (CERVERO; DAI, 2014; NEWMAN; KENWORTHY, 1996). Espera-se que esses locais estejam em áreas urbanas consolidadas, que necessitam passar por melhorias a fim de satisfazer as expectativas dos usuários.

A análise multicritério é uma ferramenta utilizada como base para a tomada de decisões, através da qual são utilizados critérios relacionados com o objeto de estudo para identificar, por exemplo, as melhores alternativas para solução do problema proposto ou para seleção de áreas prioritárias. Pesquisas na área de transportes utilizam tais análises, entre outros objetivos, para definir a localização das estações, os investimentos em infraestrutura e a prioridade de implantação e manutenção de vias. Além disso, com essa abordagem, é possível incorporar aspectos econômicos, ambientais e sociais na análise de sistemas de transporte. Optou-se pela utilização do AHP - *Analytic Hierarchy Process* (Processo Analítico Hierárquico), método criado por Saaty, que fornece uma visão global das complexas relações inerentes a uma situação e ajuda o responsável pela decisão a avaliar se os critérios em cada nível são da mesma ordem de grandeza, para que possa comparar elementos com precisão (SAATY, 1990).

Entre as mais diversas aplicações do método, pode-se elencar que Banai utiliza AHP associado a um Sistema de Informação Geográfica (SIG) para escolha de locação de estações de trem de trilhos leves (LRT) (BANAI, 2000) e para avaliar corredores de trem de trilho leve (LRT) e alternativas de rotas (BANAI, 2006). Oswald Beiler e Treat (2015) buscaram identificar métricas de sustentabilidade que abordam fatores ambientais, econômicos e sociais de projetos de transporte (redes ferroviárias ou de ônibus) usando um SIG e AHP. Bottero e Lami (2010) utilizaram AHP para investigar diferentes alternativas de projeto para melhorar a ligação de infraestrutura entre a cidade de Torino e a cidade de Venaria, levando em consideração a mobilidade sustentável e os impactos sobre a estrutura urbana. Benvenuto e Caulfield (2020) aplicaram AHP e técnicas de correlação espacial para orientar as intervenções de transporte de modo que fossem mais eficazes na redução da pobreza. Salavati et al. (2016) propuseram a definição de um conjunto de critérios para avaliar vários corredores candidatos a investimentos em transportes públicos de modo a atender a demanda de viagens e Soltani et al. (2013) utilizaram um modelo híbrido de *Fuzzy* AHP e TOPSIS (Técnica para Ordem de Preferência por Similaridade com a Solução Ideal) para analisar rotas de ônibus da região metropolitana de Shiraz/Irã para determinar quais deveriam ter prioridade para melhoria da qualidade de serviço.

Neste trabalho, o método AHP é utilizado como etapa predecessora da aplicação de modelo de otimização. De maneira levemente similar, Yağcitezkin et al. (2016) utilizaram a teoria das filas e AHP em conjunto para desenvolver um modelo para otimizar tanto o número de estações de recarga de veículos elétricos como para escolher as melhores localizações dessas estações em uma determinada região. A aplicação de ambos os métodos permite a inserção de dados socioeconômicos em um problema de otimização, principalmente quando dados mais difíceis de serem obtidos como matrizes de origem e destino não estão disponíveis.

2.3.3 Métodos de otimização e algoritmos evolutivos

De maneira geral, um modelo de otimização busca a melhor opção dentro de uma categoria de possíveis soluções ou então a configuração que melhor se adequa aos objetivos do projeto, visando um melhor aproveitamento dos recursos disponíveis. Dentro da modelagem de transporte público, é possível otimizar um problema por dois vieses: o dos passageiros e o dos operadores. Do ponto de vista dos passageiros, o sistema precisa atender a demanda observando requisitos de qualidade, regularidade, conforto e confiabilidade a um preço atrativo. Do ponto de vista do operador, o sistema deve oferecer condições para minimizar o custo. Equilibrar esses interesses conflitantes é um ponto fundamental no planejamento de transportes, o que torna esses problemas complexos de serem resolvidos. Em essência, requerem a otimização de mais de um objetivo, geralmente conflitantes entre si, ou seja, eles são denominados Problemas de Otimização Multiobjetivos (GUIHAIRE; HAO, 2008).

Resumidamente, a bibliografia estudada sobre o tema apresenta o seguinte processo de modelagem para a resolução de um problema de projeto de rede de transporte público: i) variável de decisão: propósito ou objetivo final; definição de quais são as incógnitas a serem determinadas pela solução do modelo; ii) dados de entrada: relacionados à rede física existente e aos dados de demanda; iii) funções objetivos e restrições: escolha das funções a serem minimizadas ou maximizadas, além das restrições que podem ser relacionadas, (GUIHAIRE; HAO, 2008).

As variáveis de decisão são as incógnitas a serem determinadas pela solução do modelo, e em problemas relacionados a transportes podem ser o número de ônibus para compor uma frota de determinada linha, a frequência de operação de uma linha, ou uma variável binária que determina se há implantação de faixa exclusiva em determinada via (ARBEX; BARBIERI, 2015; KHOO et al., 2014; YU et al., 2015). As funções objetivo geralmente são para minimizar determinada variável, por exemplo, o tempo de viagem, a distância de uma rota, o número de

baldeações, custo de viagem de passageiros ou operadores, frota, entre outras (ARBEX; BARBIERI, 2015; CHEN, 2015; KHOO et al., 2014; YANG; JIANG, 2020). Restrições por exemplo, podem ser com área de cobertura, número de linhas, capacidade de uma via, extensão total de faixas exclusivas, orçamento disponível ou percentual de demanda atendido (ARBEX; BARBIERI, 2015; CHEN, 2015; KHOO et al., 2014; MAUTTONE; URQUHART, 2009; YANG; JIANG, 2020).

Depois de modelado o problema, cabe decidir qual será o método de solução mais adequado. Guihaire e Hao (2008) realizaram uma revisão dos métodos utilizados para resolução de problemas associados com o projeto de rede de transporte público e suas respectivas frequências e apontam que principalmente os artigos mais recentes, tem utilizado métodos de solução baseados em heurísticas e metaheurísticas, que os autores categorizam em quatro grandes famílias: i) heurísticas específicas e ad hoc; ii) pesquisa de vizinhança (*Neighborhood Search*); iii) pesquisa evolutiva (*Evolutionary search*), onde se enquadram os algoritmos genéticos; e iv) pesquisa híbrida (*Hybrid search*) que combina dois ou mais métodos de solução.

Farahani et al. (2013) classificam os métodos de solução por eles estudados em três categorias: i) métodos exatos ou matemáticos. Os autores afirmam que apesar de algumas técnicas de programação matemática para problemas lineares e não lineares, poderem ser usadas para resolver problemas de grandes redes de forma eficiente, outras como programação inteira, são inaplicáveis para redes de médio ou grande porte por causa da ineficiência computacional; ii) heurísticas, que são geralmente desenvolvidas a partir da percepção do problema, mas pode não haver convergência; iii) metaheurísticas, que não exigem nenhuma propriedade matemática do problema para resolver as soluções e podem ser usados para obter soluções ótimas quase globais, possuem velocidade de computação muito mais rápida do que os métodos exatos para problemas de programação inteira em geral, porém em detrimento da precisão da solução.

Talbi (2009) também afirma que ao contrário dos métodos exatos, as metaheurísticas permitem enfrentar casos de problemas de grande porte, fornecendo soluções satisfatórias em um tempo razoável. Entretanto, não há garantia de encontrar soluções ótimas globais ou mesmo soluções limitadas. Entre os principais tipos de metaheurísticas utilizadas em problemas de transporte estão Recozimento Simulado (*Simulated Annealing*), Algoritmos Genéticos (*Genetic Algorithms*), Busca Tabu (*Tabu Search*), *Scatter Search*, Colônia de Formigas (*Ant Colony*), Sistemas de Formigas (*Ant System*) e Otimização do Enxame de Partículas (*Particle Swarm Optimization*) (FARAHANI et al., 2013).

Este estudo tem como foco os algoritmos evolutivos, dos quais fazem parte os algoritmos genéticos. Os algoritmos evolutivos são métodos de solução de problemas de otimização que se baseiam na teoria da seleção natural e sobrevivência do mais apto, proposta por Charles Darwin em “A Origem das Espécies”. Tais algoritmos foram propostos por Holland em 1975 e popularizados por Goldberg em 1989 (DE LACERDA; DE CARVALHO, 1999).

Entre os trabalhos clássicos de algoritmos genéticos ou evolutivos em geral utilizados para resolução de problemas de transporte, Baaj e Mahmassani (1991) propõem uma inteligência artificial com três componentes principais: um algoritmo de geração de rotas (RGA); um procedimento de análise (TRUST); e um algoritmo de melhoria de rota (RIA). Ambos os autores detalham o RGA em outro trabalho (BAAJ; MAHMASSANI, 1995). Pattnaik et al. (1998) propuseram um método de busca e otimização baseado em genética e seleção natural para a solução do problema de projeto de rede de rotas. O algoritmo tem duas fases, na primeira é gerado um conjunto de rotas candidatas que competem pela solução ótima e na segunda o conjunto ideal de rotas é selecionado usando um algoritmo genético. A área de estudo foi uma parte de Madras, na Índia. Deb et al. (2002) desenvolveram um algoritmo genético, elitista, que utiliza ordenação dos indivíduos por critério de não-dominância e mantém a diversidade da população através da distância de multidão (*crowding distance*). O *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II) é o algoritmo evolutivo mais popular na literatura para solução problemas de otimização multiobjetivo, tendo mais de 25 mil citações na base de dados SCOPUS. O NSGA-II é utilizado para resolução de inúmeros problemas, entre eles o problema do projeto de rede de transporte público, ou TNDP.

A utilização de metaheurísticas para resolução do TNDP se concentra em duas grandes áreas: i) aprimoramento dos métodos de solução e aumento da complexidade matemática dos problemas; e ii) aplicação de algoritmos clássicos, alterados ou não, em redes reais mais complexas. O desenvolvimento de novos algoritmos de solução e de modelos matemáticos mais complexos, tem como principal objeto de aplicação a Rede de Mandl, que é uma rede composta por 15 nós e 21 *links* que representa cidades de uma região da Suíça (MANDL, 1980). É o caso de Chakroborty (2003), que buscou destacar a efetividade de algoritmos genéticos para resolver problemas de projeto de redes de transporte público urbano e de Arbex e Barbieri (2015) que realizam experiências computacionais, alterando penalidades de transferência, bem como diversos parâmetros de entrada. Yang e Jiang (2020) desenvolveram modificações para o NSGA-II e analisaram a melhoria de desempenho em termos computacionais e de qualidade das soluções encontradas. Como diversos estudos utilizam a mesma rede, os estudos buscam

aprimorar aspectos matemáticos e computacionais, sendo possível comparar os resultados e o desempenho do modelo proposto com outros estudos. Ainda nessa linha de desenvolvimento, Mesbah et al. (2011) utilizam uma rede xadrez genérica para aplicar uma abordagem de programação em dois níveis. No nível superior, há uma função objetivo que representa a perspectiva dos operadores do sistema, enquanto que no nível inferior, a perspectiva dos usuários é modelada. Há a utilização de um algoritmo genético no estudo e são analisados os efeitos de aspectos como o tamanho da população, o número de gerações e a probabilidade de mutação.

Por outro lado, há a aplicação de algoritmos consolidados em redes reais mais complexas, alguns casos com modificação dos algoritmos clássicos. Mauttone e Urquhart (2009) realizaram modificações no RGA de Baaj e Mahmassani (1995) e aplicaram em uma rede na cidade de Rivera, Uruguai para determinar soluções mais atraentes para operadores sem prejudicar o custo dos usuários para o problema TNDP. Khoo et al. (2014) utilizaram o NSGA-II incorporado no Paramics para definir a localização de vias para implantação de faixas exclusivas no conglomerado urbano de Klang Valley, na Malásia. É o que este estudo se propõe, a aplicação do NSGA-II numa cidade de porte médio brasileira.

Também existem estudos, embora mais escassos, onde há desenvolvimento de um algoritmo genético e aplicação em redes reais, mesmo que simplificadas. Bielli et al. (2002) propuseram uma abordagem heurística com algoritmo genético para solucionar o problema de otimização da rede de ônibus, em um estudo de caso na cidade de Parma, Itália. Szeto e Wu (2011) integraram um algoritmo genético específico que visa otimizar rotas, e uma heurística de busca de vizinhança que visa otimizar a configuração de frequência das mesmas, e aplicaram em Tin Shui Wai (uma cidade-satélite no noroeste de Hong Kong).

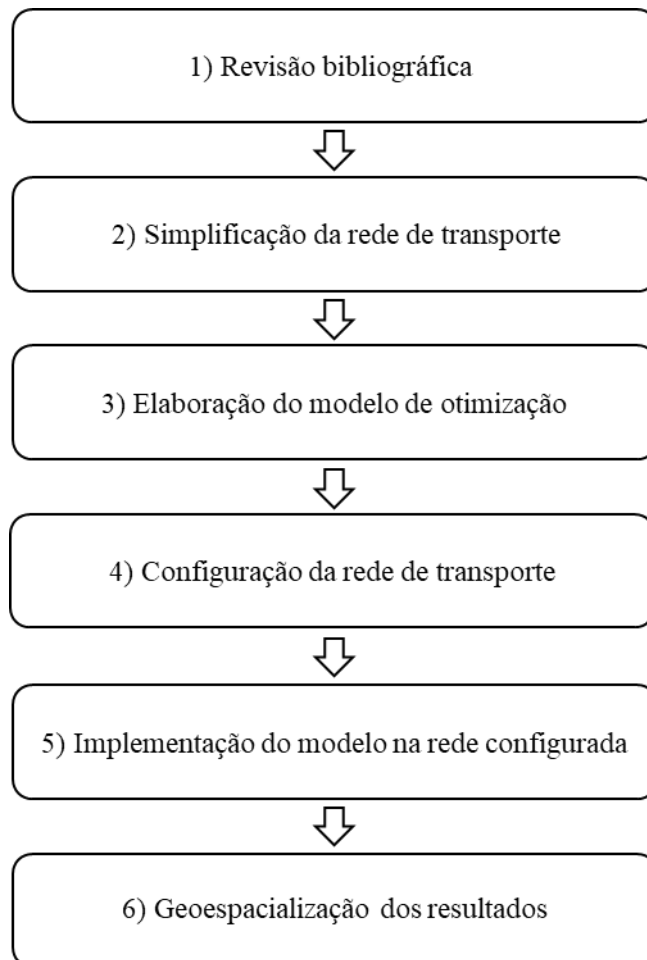
Buscou-se apresentar os trabalhos com maior relevância para esta pesquisa, mas de maneira alguma as aplicações de algoritmos genéticos em redes de transportes foram esgotadas nessa revisão. Uma revisão mais completa sobre o tema, inclusive seguindo evolução histórica, pode ser encontrada em Farahani et al. (2013), Guihaire e Hao (2008) e Kepaptsoglou e Karlaftis (2009).

3. METODOLOGIA

3.1 Etapas de trabalho

Conforme pode ser observado por meio da Figura 7, o desenvolvimento desta pesquisa foi realizado em 6 fases principais: 1) análise da bibliografia tanto de priorização de transporte público por ônibus como de métodos empregados nesta dissertação de mestrado; 2) simplificação e aprimoramento da rede de transporte, com seleção de vias elegíveis para receber as faixas exclusivas através do método *Analytic Hierarchy Process* - AHP; 3) elaboração de um modelo de otimização; 4) configuração da rede de transportes; 5) implementação do modelo na rede configurada; e 6) geoespacialização dos resultados.

Figura 7 - Etapas de trabalho da dissertação



Fonte: elaborado pela autora (2021).

Na etapa de refinamento da rede de transporte, foram aplicados os procedimentos a serem descritos no item 3.2 para selecionar, através do método de análise multicritério AHP,

um subconjunto das vias da cidade elegíveis para implantação de faixas exclusivas, de maneira a tornar a rede a ser analisada nas etapas subsequentes menor e menos complexa.

A etapa de elaboração e aplicação de um modelo de otimização, a ser detalhada no item 3.3, consiste em determinar as funções objetivo do modelo matemático de acordo com as características do problema e os dados disponíveis para solução. Por fim, ocorre a escolha de um método de solução do modelo de otimização e implementação computacional do modelo, que neste estudo foi realizada em linguagem Python.

A etapa de configuração da rede de transporte (item 3.4) tem por objetivo tornar a rede obtida na etapa 2 o mais simples possível, com um número reduzido de nós e *links*. Por exemplo, se diversos trechos de uma via da cidade foram selecionados como elegíveis na etapa 2, nesta etapa eles são, sempre que possível, reduzidos a um único segmento. Ainda, são configurados os atributos necessários para a utilização dessa rede como entrada no algoritmo de otimização.

Com a rede configurada, os dados referentes a ela são lidos no modelo de otimização e os resultados matemáticos são obtidos (etapa 5 – item 3.5). Em seguida, os resultados matemáticos são retornados à rede, para uma melhor compreensão do significado real dos mesmos (etapa 6 – item 3.6).

3.2 Aplicação do método AHP

A abordagem desta etapa do estudo possui três fases: (i) seleção dos critérios de avaliação; (ii) ponderação dos critérios de avaliação utilizando o método AHP; e (iii) normalização dos dados e análise espacial dos critérios utilizando o Sistema de Informação Geográfica (SIG).

A seleção dos critérios de avaliação baseou-se na revisão bibliográfica, nas características urbanas e de transporte, e na disponibilidade de dados em bases de dados nacionais e municipais. Após a seleção dos critérios, oito especialistas em transportes, desenvolvimento urbano e georreferenciamento responderam a uma entrevista para preencher as matrizes de comparação de pares. A seleção dos entrevistados ocorreu devido à sua atuação profissional em diferentes áreas do planejamento urbano. Os participantes receberam informações sobre o método e o objetivo deste estudo, e foram orientados a atribuir os pesos em uma planilha. Após as entrevistas, o método AHP foi aplicado para determinar os pesos de cada critério. Dentro de cada critério, existem características que resultarão em valores de prioridade mais elevados. Dito isto, houve uma fase de processamento de dados que incluiu

normalização, ajustes nos mapas e conversão de formatos em SIG, especificamente no programa QGIS. A seguir, são descritos detalhadamente os procedimentos adotados.

3.2.1 Seleção dos critérios de avaliação

A solução proposta neste estudo para a determinação de vias prioritárias à implantação de faixas exclusivas de ônibus é composta por sete critérios divididos em três grupos, conforme apresentado na Figura 8.

Figura 8 – Critérios de avaliação selecionados para utilização no método AHP

Dados socioeconômicos	Dados de uso do solo	Infraestrutura e operação do sistema de transporte público
<ul style="list-style-type: none"> • População • Densidade demográfica 	<ul style="list-style-type: none"> • Proximidade a polos geradores de tráfego – PGTs • Índice de Aproveitamento Máximo (I_{AM}) 	<ul style="list-style-type: none"> • Hierarquia viária • Tráfego de ônibus existente atualmente • Fluxo de ônibus (ônibus /hora)

Fonte: elaborado pela autora (2020).

Os critérios de população e densidade habitacional representam o volume potencial de passageiros de determinadas áreas, sendo que essas características estão ligadas principalmente às origens das viagens (SOLTANI ET AL., 2013) e o planejamento de sistemas prioritários deve refletir o uso do transporte público de e para áreas residenciais (OSWALD BEILER E THREAT, 2015). A demanda de viagens aumenta conforme a população aumenta, portanto, áreas com maior contingente populacional devem ser priorizadas, sendo a mesma premissa válida para áreas mais densas. Cabe uma ressalva em relação à sobreposição desses dois fatores. Embora esses critérios estejam relacionados, eles podem representar diferentes configurações urbanas e, portanto, os dois critérios devem ser considerados para o planejamento de sistemas prioritários. É possível que haja um grande contingente populacional em uma grande área urbana e, portanto, a densidade demográfica será menor. Ao passo que um contingente populacional menor pode estar concentrado em uma área pequena, apresentando maiores densidades. Em uma situação limite, onde há um alto contingente populacional e uma alta densidade, a prioridade do local será maior que nos dois exemplos supracitados.

Conforme apresentado na subseção 2.2.1, o tipo de uso do solo de influencia o padrão de viagens. A estratégia de Desenvolvimento Orientado ao Transporte – DOT, norteadora desse estudo, busca concentrar moradias, empregos e locais públicos próximos ao transporte público,

de modo a melhorar a sustentabilidade das cidades e reduzir a dependência de automóveis (EMBARQ BRASIL, 2015; SUZUKI; CERVERO; IUCHI, 2013). Desse modo, os critérios selecionados para o uso do solo buscam aproximar a oferta de infraestrutura prioritária de transporte público a pontos de interesse de viagens dentro de uma cidade, além de incorporar a regulamentação legislativa para uso e ocupação do solo prevista no Estatuto da Cidade através de coeficientes ou índices de aproveitamento do solo (BRASIL, 2001).

Redes de transporte público eficientes devem prover acesso a locais de uso público tais como escolas, universidades, hospitais, centros comerciais, serviços públicos e polos de emprego e renda (OSWALD BEILER; THREAT, 2015). Portanto, áreas próximas a esses polos geradores de tráfego (PGT) devem ser priorizadas. Essa condição é representada neste estudo pelo critério de proximidade a PGTs.

O critério de uso misto do solo é comumente adotado em diversas pesquisas sobre áreas prioritárias para sistemas de transporte (BANAI, 2000; FELIX ET AL.; 2017; OSWALD BEILER; THREAT, 2015; WEI, 2015). Neste estudo, o tipo de uso do solo é adereçado com a utilização do Índice de Aproveitamento Máximo (I_{AM}). O Estatuto da Cidade (2001) prevê que municípios com mais de 20 mil habitantes devem elaborar um plano diretor. Neste plano diretor, existe a regulamentação do uso do solo, como o tipo de uso e a possibilidade de adensamento em determinadas áreas. É comum que os municípios atribuam restrições e permissões de uso do solo a coeficientes ou índices de aproveitamento. Valores elevados desses coeficientes e índices geralmente estão associados a uma maior possibilidade de densificação e diversidade de uso na área, orientando o crescimento das cidades (Brasil, 2001). O planejamento de sistemas prioritários deve estar alinhado com a legislação pertinente, portanto quanto maior o valor do Índice de Aproveitamento Máximo (I_{AM}) de determinada área, maior a prioridade dessa área para receber faixas exclusivas de ônibus.

Os critérios de infraestrutura e operação do sistema de transporte público buscam representar a oferta desse direito em uma cidade. A utilização da hierarquia viária busca diferenciar os tipos de via, ou seja, uma via de caráter local terá uma prioridade menor de implantação de faixas exclusivas de ônibus em relação a vias coletoras e arteriais, justamente pelas diferenças em termos de perfil viário e velocidade permitida, por exemplo. O critério de tráfego de ônibus existente atualmente, ou seja, se existem linhas de ônibus circulando na via, busca garantir que vias onde já existe operação de transporte público sejam prioritárias em relação às que não possuem circulação. Por fim, o fluxo de ônibus busca priorizar vias onde o a circulação de ônibus é maior.

3.2.2 AHP - Analytic Hierarchy Process

O AHP - *Analytic Hierarchy Process* é um método de tomada de decisão baseado na seleção e posterior ordenamento de atributos ou critérios importantes para a solução de um problema. Esse ordenamento pode ser obtido a partir da comparação par a par dos atributos elencados, conforme definido por Saaty (1990) e apresentado no Quadro 2. A partir da comparação par a par, a matriz da Eq. (1) é montada.

Quadro 2 - Escala de referência para comparação dos critérios

Valor	Definição	Explicação
1	Igual importância	Os dois critérios contribuem de forma idêntica para o objetivo
3	Pouco mais importante	A análise e a experiência mostram que um critério é um pouco mais importante que o outro
5	Muito mais importante	A análise e a experiência mostram que um critério é claramente mais importante que o outro
7	Bastante mais importante	A análise e a experiência mostram que um dos critérios é predominante para o objetivo
9	Extremamente mais importante	Sem qualquer dúvida um dos critérios é absolutamente predominante para o objetivo
2, 4, 6, 8	Valores intermediários	Também podem ser utilizados

Fonte: Saaty (1990).

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1j} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{i1} & \cdots & a_{ij} & \cdots & a_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nj} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

A matriz $A = (a_{ij})$, onde $a_{ij} = w_i / w_j$, $i, j = 1 \dots n$, tem entradas positivas e satisfaz a propriedade de ser recíproca, isto é, $a_{ji} = 1 / a_{ij}$. Multiplicando A pelo vector de pesos $w = (w_1, w_2 \dots w_n)^T$, o resultado é nw . Se n é um autovalor de A , então W é o autovector associado a ele (Eq. (2)) (Saaty e Vargas, 2012).

$$Aw = \begin{bmatrix} w_1/w_1 & \cdots & w_1/w_j & \cdots & w_1/w_n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ w_i/w_1 & \cdots & w_i/w_j & \cdots & w_i/w_n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ w_n/w_1 & \cdots & w_n/w_j & \cdots & w_n/w_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_j \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} = n \begin{bmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_j \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} = nw \quad (2)$$

A solução de $Aw = nw$ não pode ser calculada diretamente porque só é possível estimar os valores de w_i / w_j , não atribuir valores exatos. O problema torna-se $Aw = \lambda_{\max} w$, onde λ_{\max} é o maior ou principal autovalor de A , como mostra a Eq. (3) (Saaty, 1990; Saaty e Vargas, 2012).

$$AW = \lambda_{max}W \quad (3)$$

A consistência estatística é garantida para valores de CR (Razão de Consistência) < 10%, calculado conforme apresentado nas Equações (4) e (5). Caso a matriz apresente um CR maior do que 10%, recomenda-se rever os pesos de cada critério Saaty (1990).

$$I.C. (\text{Índice de Consistência}) = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (4)$$

$$C.R. = \frac{I.C.}{\text{Índice Randômico (IR) para } n} \quad (5)$$

Tabela 2 - Índice Randômico (IR) para o método AHP

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
IR	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Fonte: Saaty (1990).

O vetor de prioridade obtido a partir de cada matriz de comparação de pares é $w_i = [w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6, w_7]^T$. Para agregar todas as respostas das entrevistas, os pesos prioritários médios foram calculados através da Eq. (6), como proposto por Afolayan et al. (2020). Note-se que na equação n é o número de entrevistados e W_i é o peso prioritário final de cada critério.

$$W_i = \frac{\sum_{i=1}^7 w_i}{n} \quad (6)$$

3.2.3 Normalização de dados referentes aos critérios

A normalização dos dados se faz necessária pois para cada critério são determinadas quais características resultam em prioridade maior, mas a comparação entre os critérios deve ser feita com a mesma escala. Para tal, todos os valores internos de cada critério foram normalizados entre os valores de 0 e 1.

Os critérios população [habitantes], densidade habitacional [habitantes / hectare²], Índice de Aproveitamento Máximo (IAM) [sem unidade] e fluxo [ônibus / hora], que possuem valores numéricos, foram normalizados de acordo com a Equação (7). Valores normalizados próximos a 1 indicam os locais com maiores valores numéricos desses critérios e, portanto, maior grau de prioridade.

$$X_{normalizado} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (7)$$

Para a hierarquia viária, vias arteriais e coletoras receberam valor 1 e as demais valor 0. Para vias onde há circulação de ônibus atualmente, foi atribuído o valor 1, para as demais, 0 (Quadro 3).

Quadro 3 – Grau de prioridade para os critérios “hierarquia viária” e “circulação de ônibus atualmente”

Critérios	Descrição e unidades	Prioridade Alta
Hierarquia viária	Hierarquia das vias de acordo com o Plano Diretor (sem un.)	Vias arteriais e coletoras
Circulação de ônibus atualmente	Vias que possuem rotas de ônibus circulando atualmente (sem un.)	Se há circulação na via atualmente

Fonte: elaborado pela autora (2020).

A influência dos Polos Geradores de Tráfego foi definida pela multiplicação de dois pesos, um para o tipo de uso e um para a distância. Para o tipo de uso, o uso industrial recebeu um peso de 0,5, aos demais usos foi atribuído o valor 1. O uso do valor 0,5 para o uso industrial foi adotado por esse tipo de uso estar relacionado principalmente a deslocamentos pendulares em horários de pico. A seleção de vias próximas a polos industriais poderia configurar uma implantação de faixa exclusiva com subutilização, e, portanto, esse uso teve seu peso relativo diminuído.

A parcela correspondente à distância dos polos foi definida por um raio de 600 metros ao seu redor, partindo do pressuposto de que essa é a distância média que as pessoas estariam dispostas a caminhar para acessar o polo gerador (LERNER, 2009). Sabe-se que a existência de um corredor a 600 metros não significa necessariamente que haverá uma estação ou ponto de parada dentro dessa distância, mas a simplificação foi realizada com base no escopo desse estudo. Assume-se que com a existência da via prioritária, haverá a possibilidade de embarque e desembarque relacionada a ela. Dentro desse raio de 600 metros, foram definidas três faixas de influência e atribuídas as seguintes equivalências: i) $d \leq 200m = 1,0$ (prioridade alta); ii) $200m < d < 400m = 0,75$ (prioridade média); iii) $400m < d < 600m = 0,5$ (prioridade baixa). Com essas definições, quanto mais próxima a via está de um polo gerador, maior prioridade ela terá para implantação de faixas exclusivas.

Para o valor final relacionado ao critério Polos Geradores de Tráfego, foi multiplicado o valor do uso do polo e o valor da distância. Como ambos os valores estão entre 0 e 1, a

multiplicação também ficará entre esses valores e, portanto, estão normalizados para a comparação com os outros critérios.

3.2.4 Ajustes em Sistemas de Informação Geográfica

Depois de normalizados os atributos dos critérios, todos os mapas de critérios foram convertidos para o formato raster no QGIS, para posterior aplicação do método AHP. Os dados vetoriais dos mapas de critérios foram transformados para formato raster associando os respectivos valores normalizados. Todos os arquivos vetoriais de critérios foram transformados com tamanho de 10.000 pixels na horizontal e na vertical e com a mesma extensão de camada, para que quando sobrepostos houvesse equivalência de comparação dos dados. Para que os resultados ficassem mais visíveis, aos critérios relacionados à malha viária foi adicionado um buffer de 50 metros. Dessa maneira, foi possível sobrepor as áreas adjacentes aos eixos viários aos mapas dos demais critérios. Para a obtenção do resultado final, foi utilizada a calculadora raster (Figura 9) do software QGIS, multiplicando os arquivos raster pelos pesos médios do método AHP.

Figura 9 – Aplicação do método AHP na calculadora raster do software QGIS



Fonte: elaborado pela autora (2020).

3.3 Método de otimização

Conforme mencionado anteriormente, um modelo de otimização busca a melhor opção dentro de uma categoria de possíveis soluções ou então a configuração que melhor se adequa aos objetivos do projeto, visando um melhor aproveitamento dos recursos disponíveis. O principal objetivo da resolução de um problema de otimização multiobjetivo é obter o conjunto ótimo de Pareto e, conseqüentemente, a fronteira de Pareto. Uma solução é da fronteira de Pareto se não for possível melhorar um determinado objetivo sem deteriorar pelo menos outro objetivo (TALBI, 2009). A seguir, são descritas as definições para o modelo matemático adotado nesse estudo bem como o algoritmo de solução.

3.3.1 Modelo matemático

O modelo matemático deste estudo considera como variável de decisão uma variável binária conforme Eq. (8), onde a variável assume valor 1 se uma faixa exclusiva é implantada na via, e valor 0 caso contrário.

$$\Delta_a: \text{variável binária (0 – 1);} \quad (8)$$

As funções objetivo do problema são definidas nas Eq. (9) e (10) e buscam: i) Z_1 : minimizar o tempo total de circulação na rede, sendo o somatório de tempo de deslocamento no *link* de todos os *links* da rede. A multiplicação por 60 tem o caráter de conversão de horas para minutos, para melhor visualização dos resultados; ii) Z_2 : minimizar a extensão total de faixas exclusivas construídas na rede, sendo o somatório da distância do *link* multiplicada por sua respectiva pontuação AHP e pela variável de decisão Δ_a para todos os *links* da rede. No caso de a variável de decisão assumir o valor 0 no *link*, a parcela referente àquele *link* torna-se nula. Por se tratar de um problema de minimização, ou seja, quanto menor o valor retornado, melhor é a solução, a pontuação AHP é usada de maneira invertida, dado que no método AHP quanto maior a pontuação, melhor é a solução. Portanto, quanto maior a pontuação do *link* obtida na etapa de seleção através do método AHP, menor será a pontuação relativa na equação de Z_2 .

$$\min Z_1 = \sum_{rede} t_{veículo(a)}(h) * 60 \quad (9)$$

$$\min Z_2 = \sum_{rede} \frac{1}{pontuação\ AHP_a} * distância_a(km) * \Delta_a \quad (10)$$

Onde:

Z_1 : função objetivo 1, tempo total de deslocamento na rede, em minutos;

Z_2 : função objetivo 2, resultante do somatório da multiplicação da pontuação AHP invertida pela distância total de faixas exclusivas implantadas;

$t_{veículo(a)}$: tempo de viagem dentro de veículo no *link* a, entre seus respectivos pontos de início e fim, em horas (h);

$distância_a$: distância do *link* a, entre seus respectivos pontos de início e fim, em quilômetros (km);

O caráter conflitante das duas funções objetivo, característica de problemas multiobjetivo, se dá pelo fato de que quanto mais faixas exclusivas forem implantadas na rede, menor será o tempo total de deslocamento na rede, mas maior será a distância. Desta forma, se os valores de Z_1 são reduzidos, os valores de Z_2 aumentam. Aponta-se ainda que os resultados da função Z_1 representam o tempo total de viagem dentro do veículo, em minutos, em todos os *links* da rede uma única vez, i.e., a redução de tempos de viagem devido à implantação de faixas exclusivas é considerada apenas uma vez. Isso é efeito de uma simplificação matemática, uma vez que o cálculo da redução de tempo de viagem considerando o fluxo de veículos em cada *link* e ao longo de um dia seria muito complexo. Ainda, a rede é considerada sem direção de circulação.

A Eq. (11) define o tempo de viagem dentro do veículo.

$$t_{veículo(a)} = \frac{distância_a}{velocidade_{veículo}} \quad (11)$$

Onde:

$t_{veículo(a)}$: tempo de viagem dentro de veículo no *link* a, entre seus respectivos pontos de início e fim, em horas (h);

$distância_a$: distância do *link* a, entre seus respectivos pontos de início e fim, em quilômetros (km);

$velocidade_{veículo}$: velocidade do veículo no *link* a, em quilômetros por hora (km/h);

A velocidade_{veículo} padrão adotada no caso de a variável de decisão ser igual a 0 é de 14km/h. Se a variável de decisão Δ_a assume o valor 1, então a velocidade é calculada pela Eq. (12), onde a velocidade do veículo sofre um incremento de 40% em relação à velocidade padrão estabelecida. Os dados de velocidade padrão e incremento foram adotados de NTU (2015).

$$\begin{aligned} \text{velocidade}_{\text{veículo}} &= \text{velocidade}_0, \text{ se } \Delta_a = 0 \\ \text{velocidade}_{\text{veículo}} &= 1,4 * \text{velocidade}_0, \text{ se } \Delta_a = 1 \end{aligned} \quad (12)$$

Onde:

velocidade_{veículo}: velocidade do veículo no *link* a, em quilômetros por hora (km/h);

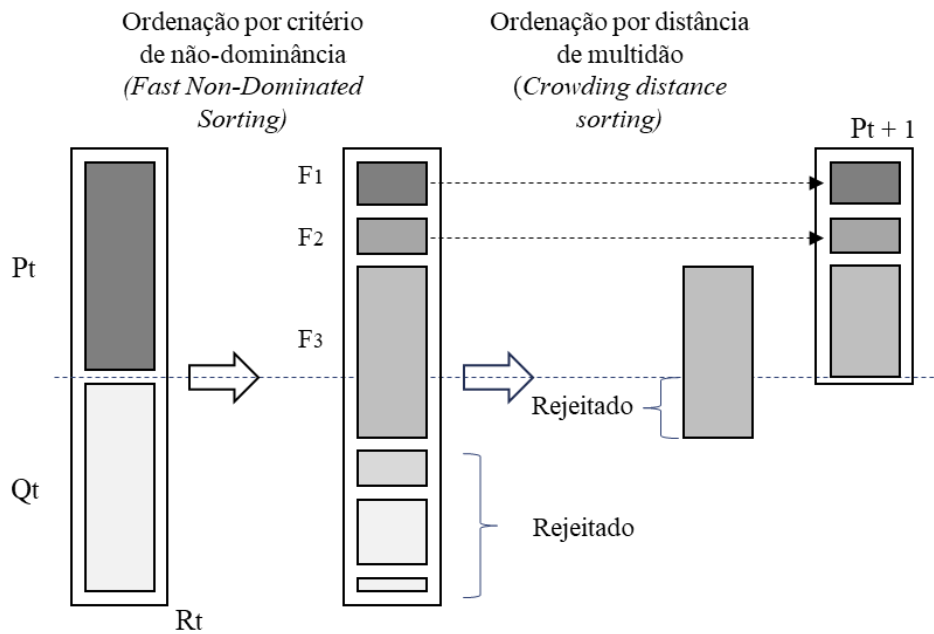
velocidade₀: velocidade_{veículo} padrão, previamente estabelecida como 14km/h;

Δ_a : variável de decisão.

3.3.2 Algoritmo de solução

O método de solução utilizado foi o NSGA-II, *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II*, que é um algoritmo evolutivo com forte estratégia de elitismo, sendo considerado um dos algoritmos mais eficazes para resolução de problemas multiobjetivos. O NSGA-II realiza dois processos de ordenação: primeiro, da população em um ranking por critério de não-dominância (*Fast Non-dominated Sorting Algorithm*) e a ordenação dos indivíduos pela distância de multidão (*Crowding Distance*), realizando a busca por soluções bem distribuídas no espaço (DEB et al., 2002).

Um esquema do procedimento do NSGA-II é apresentado na Figura 10 e o pseudocódigo no Algoritmo 1. São fornecidos como dados de entrada o tamanho da população N, o número de gerações g e as funções objetivo $f_k(x)$, onde k é o número de objetivos. Para a determinação do número de indivíduos e de gerações, os valores de N foram alterados de 20 a 200, enquanto que os valores de g foram variados de 200 a 5000. Após exaustivos testes, notou-se que a melhor parametrização foi obtida com os valores N = 100 e g = 2000, sendo os valores adotados para a resolução do problema deste estudo. As funções objetivo foram apresentadas no item 3.3.1.

Figura 10 – Procedimento do NSGA-II

Fonte: Adaptado de Deb et al. (2002).

Algoritmo 1 – Pseudocódigo do NSGA-II

Entrada: N , g , $f_k(x)$

1 Início

- 2 Inicializa a população P_0 de tamanho N ;
- 3 Avalia os valores das funções objetivo dos indivíduos de P_0 ;
- 4 Atribui um rank para os indivíduos de P_0 baseado na dominância de Pareto;
- 5 Gera a população filho Q_0 ;

6 Início

- 7 Seleção por torneio binário;
- 8 Cruzamento e mutação;
- 9 Calcula os valores dos objetivos dos indivíduos criados;

10 Fim

11 para $t = 1$ até g **faça**

12 $R_t = P_t + Q_t$;

13 para cada x em R_t **faça**

14 | Atribui um rank baseado em Pareto para x ;

15 Fim

16 Gera as fronteiras de soluções não dominadas (F_i) de acordo com o rank de cada solução;

17 Calcula o crowding distance para cada solução de F_i ;

18 População P_{t+1} com as soluções das melhores fronteiras F_i ;

19 Gera a população filho Q_{t+1} ;

20 Início

- 21 Seleção por torneio binário;
- 22 Cruzamento e mutação;
- 23 Calcula os valores dos objetivos dos indivíduos criados;

24 Fim

25 Fim

26 Fim

Fonte: Adaptado de Coello et al. (2007).

Onde:

N: tamanho da população;

g: número de gerações;

$f_k(x)$: funções objetivo;

k: número de objetivos;

P_0 : População inicial;

Q_0 : População filho;

t: geração;

R_t : combinação da população pai P_t e da população filho Q_t , de tamanho $2N$;

P_t : População pai na geração t;

Q_t : População filho na geração t;

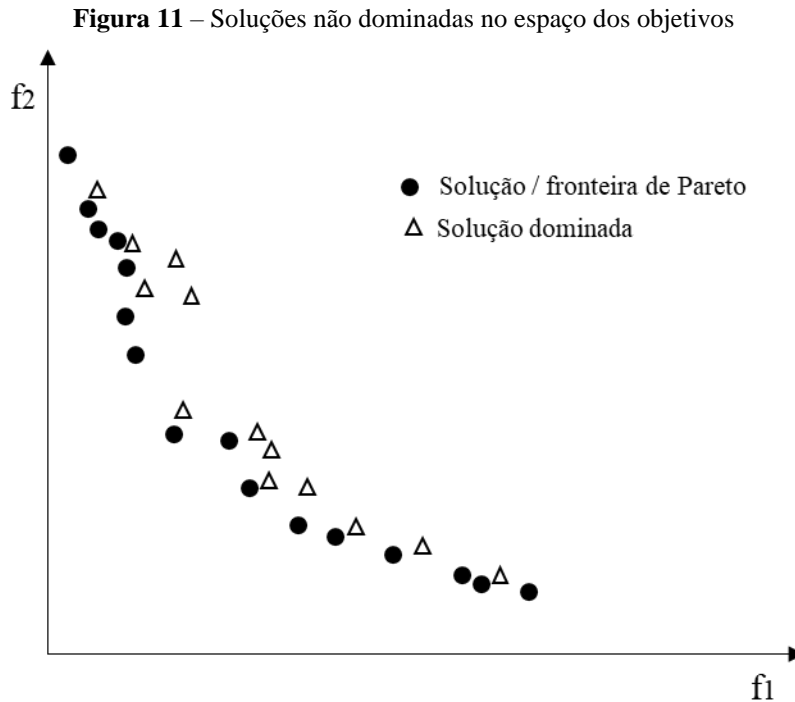
F_t : fronteiras de soluções não dominadas;

O algoritmo inicializa a população pai P_0 de tamanho N, avalia os indivíduos gerados de acordo com seus respectivos valores das funções objetivo, atribui um rank para esses indivíduos (linhas 2 a 4) e em seguida gera uma população filho Q_0 através de cruzamento e mutação (linhas 5 a 10).

Para cada geração de 1 a g, a população R_t , formada pelos indivíduos da população pai P_t e os indivíduos da população filho Q_t , são ordenados de acordo com um ranking por critério de não-dominância (*Fast Non-dominated Sorting Algorithm*) (linhas 11 a 15), gerando as fronteiras de soluções não dominadas (linha 16). Esse é o primeiro processo de ordenamento dos indivíduos. Para cada indivíduo, são calculados: 1) contagem de dominação n_p , ou seja, o número de indivíduos que dominam o indivíduo p; e 2) S_p , o conjunto de soluções dominadas por p. Todos os indivíduos que estão no primeiro conjunto não dominado, ou seja, não são dominados por nenhum outro indivíduo, recebem $n_p = 0$. Para cada indivíduo p com $n_p = 0$, cada indivíduo por ele dominado, isto é, cada indivíduo dentro do conjunto S_p , tem o valor de n_p reduzido em 1 unidade. Todos os indivíduos que passarem a ter $n_p = 0$ depois desse procedimento, passam a integrar o segundo conjunto não dominado. O procedimento é repetido até todos os conjuntos não dominados terem sido identificados (DEB et al., 2002; COELLO et al., 2007).

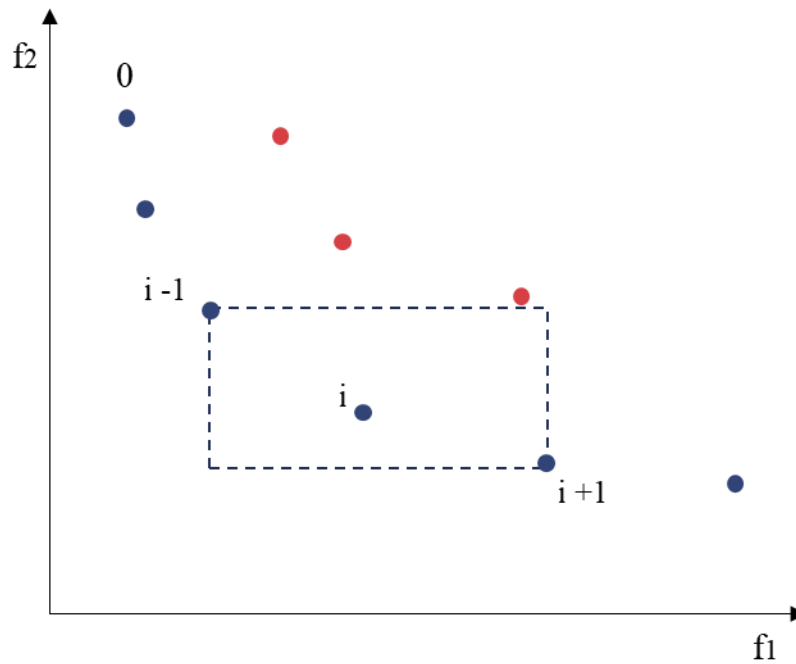
Cabe apontar aqui que, matematicamente, diz-se que uma solução factível a domina uma outra solução factível b se e somente se $f_i(a) \leq f_i(b)$ para $i = 1, \dots, k$ e $f_i(a) < f_i(b)$ para pelo menos uma função objetivo k. Uma dada solução x^* é dita pertencer ao conjunto (fronteira) de Pareto se não existir nenhuma outra solução x factível capaz de melhorar um dos objetivos do

problema (em relação a x^*) sem simultaneamente piorar pelo menos um dos demais (TALBI, 2009). A Figura 11 apresenta um exemplo gráfico de soluções não dominadas (fronteira de Pareto) e de soluções dominadas.



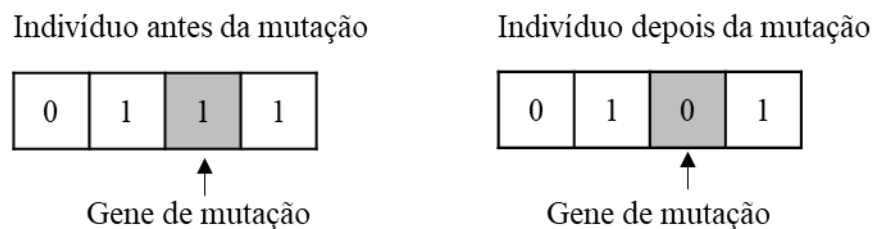
Fonte: Adaptado de Talbi (2009).

Dentro de cada conjunto não-dominado é realizada a segunda ordenação, desta vez dos indivíduos pela distância de multidão (*Crowding Distance*), que tem por objetivo garantir a diversidade das soluções e busca estimar a vizinhança de cada indivíduo no espaço de objetivos do problema (linha 17). Nesse cálculo, toda a população é ordenada de acordo com o valor de cada função objetivo em ordem ascendente. Para cada função objetivo, os indivíduos com maior e menor valor, recebem o valor *Crowding Distance* = infinito. Todos os indivíduos intermediários recebem o valor igual ao valor absoluto da diferença nos valores das funções objetivo de duas soluções adjacentes, conforme ilustrado na Figura 12. O valor total da *Crowding Distance* de cada indivíduo é calculado como a soma dos valores individuais da distância de cada objetivo (DEB et al., 2002).

Figura 12 – Cálculo da distância de multidão

Fonte: Adaptado de Deb et al. (2002).

Ambas as ordenações, por critério de não-dominância e distância de multidão, determinam quais indivíduos vão para a próxima geração P_{t+1} (linha 18) e também são utilizadas na seleção (linhas 7 e 21). Novos indivíduos são gerados a partir do cruzamento (*crossover*) e mutação (linhas 8 e 22). Cabe apontar que a mutação foi adaptada neste trabalho, em virtude de o problema aqui trabalhado possuir variável de decisão binária, conforme definições de Gomez et al. (2010). Se um número aleatório, gerado no intervalo $[0,1]$ for superior a uma dada probabilidade, a mutação consiste em uma mudança clássica no valor do gene de 0 para 1 ou de 1 para 0, conforme Figura 13.

Figura 13 – Procedimento de mutação de variáveis binárias

Fonte: Adaptado de Gomez et al. (2010).

3.4 Construção da rede para otimização

Após a obtenção das vias elegíveis para a implantação de faixas exclusivas através do método AHP, foi feita uma simplificação na rede obtida. Por exemplo, se diversos trechos de uma via foram selecionados como elegíveis, nesta etapa eles são, sempre que possível, reduzidos a um único segmento. Ainda, foram configurados os atributos necessários para a utilização dessa rede como entrada no algoritmo de otimização, como distância em quilômetros, e as respectivas pontuações AHP de cada *link*.

A simplificação da rede traz algumas penalidades. Se por um lado é necessário reduzir a complexidade da rede, que refletirá na complexidade computacional da próxima etapa, por outro a precisão do valor da pontuação AHP é reduzida. Com a junção de vários segmentos de uma via em um único *link*, a pontuação AHP atribuída a esse *link* é a pontuação predominante nos segmentos que o formaram. Ainda, trechos isolados e desconectados não foram considerados para a otimização. Após configurados os atributos da rede, um arquivo em formato .csv é gerado com os atributos e a identificação de cada *link*. Nesse arquivo estão parte dos dados de entrada necessários para implementação do modelo de otimização na rede.

3.5 Implementação do modelo de otimização na rede

Nesta seção são descritos os aspectos de implementação da abordagem proposta. A implementação foi realizada em Python 3.8 (VAN ROSSUM; DRAKE, 2009), através da IDE Pycharm 2021.1.1 (do inglês *Integrated Development Environment* ou Ambiente de Desenvolvimento Integrado) (JETBRAINS, 2021). A linguagem Python é software livre e combina um poder considerável de processamento com uma sintaxe simples e clara. Foi utilizada a versão *Community* da IDE Pycharm, que também é código livre e disponibilizada gratuitamente (JETBRAINS, 2021).

Foram criadas 8 classes no código, listadas a seguir juntamente com as ações por elas realizadas:

- *Links*: realiza a leitura dos dados de entrada;
- *Otimização*: realiza os cálculos dos valores das funções objetivo;
- *Indivíduo*: armazena as características dos indivíduos, como classificação, distância de multidão, soluções dominadas, *features*, objetivos. Em *features*, a variável de decisão é armazenada.
- *População*: armazena as características da população de cada geração e dos respectivos *fronts*;

- Problema: executa funções iniciais como geração de indivíduos e execução das funções da classe Otimização;
- NSGA-II: contém todas as funções padrão do NSGA-II, como ordenamento por critério de não-dominância (*Fast Non-dominated Sorting Algorithm*), cálculo da distância de multidão (*Crowding Distance*), procedimentos de sorteio binário, cruzamento (*crossover*) e mutação;
- Evolução: executa as funções da classe NSGA-II.
- Impressão: imprime os resultados das funções objetivo e salva arquivos .csv com dados da classe Indivíduo (*features* e objetivos).

Os dados de entrada lidos na classe *Links* devem estar em formato .csv e conter o ID de cada *link*, a distância e a respectiva pontuação AHP. Para a leitura dos dados, foi utilizada a biblioteca Pandas para Python (MCKINNEY et al., 2010), que permite manipulação e análise de dados. Além disso, foram utilizadas no código as bibliotecas Numpy (HARRIS et al., 2020) e Matplotlib (HUNTER, 2007). Os dados de saída desta etapa consistem em gráficos com as fronteiras de Pareto de todas as gerações múltiplas de cem, os valores das funções objetivo de cada indivíduo e suas respectivas *features*, que representam a variável de decisão Δ_a do problema matemático, conforme apresentado no item 3.3.1.

3.6 Geoespacialização dos resultados

A geoespacialização dos resultados do método de otimização foi realizada no software QGIS, tendo como dados de entrada os dados de saída da etapa anterior. Foram selecionados indivíduos estratégicos para espacialização, dos quais foram utilizados os valores binários das *features* para representação gráfica da rede. Os resultados dessa etapa consistem nos resultados finais deste trabalho e os diferentes indivíduos da etapa de otimização foram comparados com o fim de apresentar diferentes possibilidades de construção de redes prioritárias de faixas exclusivas.

Ainda, a fim de analisar a coerência das soluções espacializadas foram comparadas através do indicador “quilômetros de vias dedicadas exclusivamente ao transporte público por 100.000 habitantes” (km / 100.000 habitantes), cujos valores de referência são estabelecidos pelo Banco Interamericano de Desenvolvimento na série de indicadores da Iniciativa Cidades Emergentes e Sustentáveis (ICES) (BID, 2013) e apresentados na Tabela 3. As categorias são “verde” (sustentável; bom desempenho), “amarelo” (desempenho potencialmente problemático) ou “vermelho” (não sustentável; desempenho altamente problemático). Aponta-

se, entretanto, que os valores do BID são bastante exigentes e possivelmente não condizentes com a realidade brasileira. Portanto, nessa análise também serão utilizados os valores apresentados pelo IDEC - Instituto Brasileiro De Defesa Do Consumidor (2020), para as cidades de Curitiba (9,27 km / 100.000 habitantes), Porto Alegre (8,63 km / 100.000 habitantes) e São Paulo (6,49 km / 100.000 habitantes), que possuem os maiores valores para o indicador nas doze cidades estudadas pelo instituto.

Tabela 3 - Valores de referência para o indicador “quilômetros de vias dedicadas exclusivamente ao transporte público por 100.000 habitantes” (km / 100.000 habitantes)

Verde	Amarelo	Vermelho
> 40	10 – 40	< 10

Fonte: BID (2013).

4. ESTUDO DE CASO

4.1 Cidades médias brasileiras

Neste estudo, é adotada a definição de cidades médias estabelecida pelo IBGE, i.e., aquelas com população entre 100 e 500 mil habitantes. A partir da década de 1970, o Brasil passou por um intenso processo de reorganização territorial, no qual o ritmo de crescimento das grandes aglomerações metropolitanas se inverteu e as cidades médias passaram a ter mais dinamismo (GOULART; TERCI; OTERO, 2013). Os dados do Censo de 2010 mostram que havia 245 municípios no perfil de cidade média, abrigando cerca de 25,46% da população nacional (IBGE, 2010c). A taxa de crescimento das cidades médias entre 2001 e 2010 foi de 1,50%, enquanto a média nacional foi de 1,17% (IPEA, 2010).

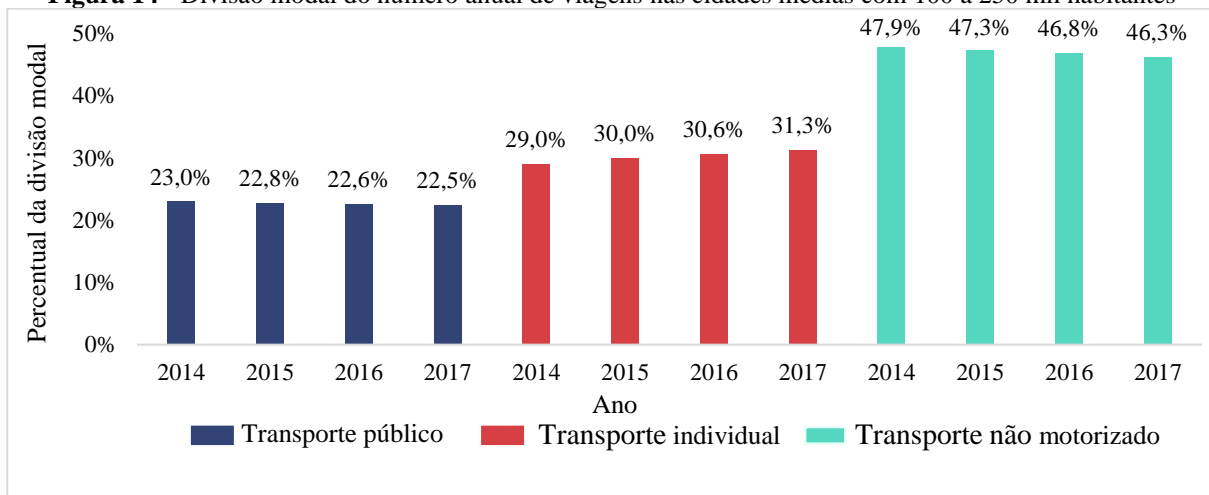
Esse processo de reestruturação territorial ocorreu de maneira mais acentuada no interior paulista, em um fenômeno chamado de “desconcentração concentrada”. Ao longo do período 1970-2000, a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) perdeu participação no setor industrial, com forte migração para o interior do estado, principalmente para municípios dotados de infraestrutura. As mudanças econômicas se refletiram na demografia das cidades (GOULART; TERCI; OTERO, 2013). Atualmente no estado de São Paulo, 66 municípios se enquadram nessa faixa de população de 100 a 500 mil habitantes, abrigando um total de 13.338.575 habitantes, correspondentes a cerca de 32,33% da população total do estado. Esses municípios apresentam urbanização elevada, sendo que dos 66, apenas 16 possuem taxa menor que a do estado (95,9%). Ainda nesse universo, 17 municípios possuem população totalmente urbana (IBGE, 2010a).

A análise de alguns movimentos migratórios e populacionais feita pela Organização das Nações Unidas (ONU) em 2011 revela que essa tendência é mundial e o crescimento da população tem se concentrado em áreas urbanas menores, diferentemente do século XX cuja concentração de crescimento populacional ocorreu em grandes aglomerações urbanas. Atualmente, cidades com menos de 500 mil habitantes já abrigam mais de 50% da população urbana total. O principal problema desse crescimento acelerado dos centros urbanos médios é a incapacidade de promover mitigação e ações de adaptação ao crescimento de maneira rápida. Por outro lado, existe a possibilidade de planejar antecipadamente esse crescimento e orientar o desenvolvimento, sendo que o setor de transportes é um dos mais relevantes para o sucesso dessa iniciativa (ONU, 2011). Estudos sobre sistemas prioritários como BRT em grandes centros urbanos são vastos e casos clássicos de sucesso como Curitiba (Brasil) e Bogotá (Colômbia) aparecem diversos estudos da área (BRASIL, 2008; CERVERO; DAI, 2014;

EMBARQ BRASIL, 2015; NEWMAN; KENWORTHY, 1996; SUZUKI; CERVERO; IUCHI, 2013). Cervero e Dai (2014) ressaltam a importância de estudos relacionados ao Desenvolvimento Orientado ao Transporte e sistemas BRT - *Bus Rapid Transit* em cidades de porte médio, dadas as perspectivas de crescimento da população mundial em tais núcleos.

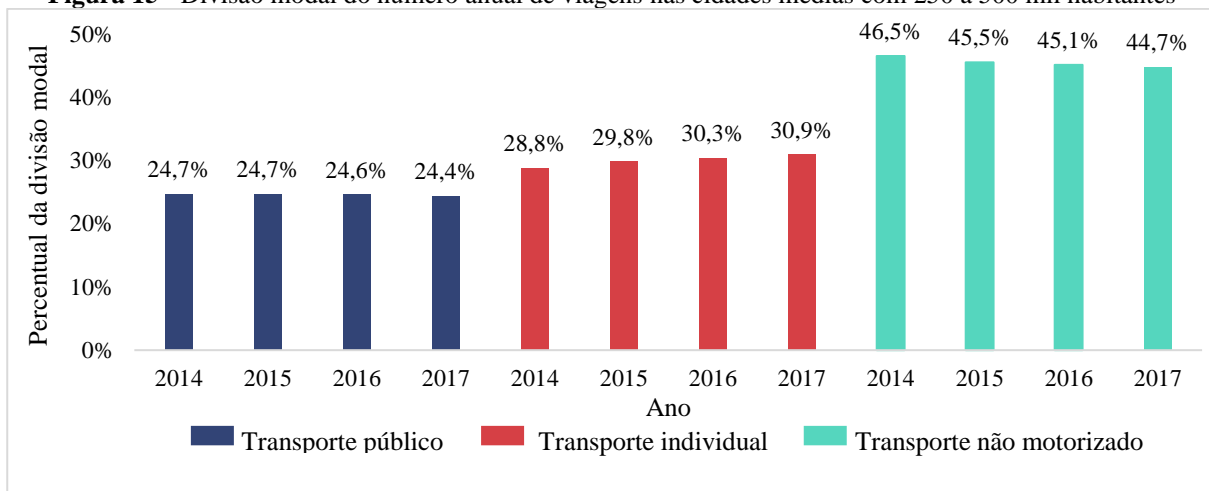
Com relação aos dados de mobilidade urbana, as cidades médias possuem uma divisão modal conforme apresentado na Figura 14 e na Figura 15. Apesar de a mobilidade ativa ser responsável pelo maior percentual de deslocamentos, as viagens a pé e por bicicleta são realizadas em curtas distâncias. Com a priorização de modos de transporte públicos, há um aumento significativo das distâncias percorridas pelos cidadãos (ANTP, 2020).

Figura 14 - Divisão modal do número anual de viagens nas cidades médias com 100 a 250 mil habitantes



Fonte: elaborado pela autora, adaptado de ANTP (2018a, 2018b, 2018c, 2020).

Figura 15 - Divisão modal do número anual de viagens nas cidades médias com 250 a 500 mil habitantes



Fonte: elaborado pela autora, adaptado de ANTP (2018a, 2018b, 2018c, 2020).

Nos municípios de médio porte, os percentuais de viagens realizadas com transporte público representam menos de 25% do total de viagens, a participação dos modos individuais se mantém em torno de 30% e as viagens não motorizadas em torno de 45%. Percebe-se uma queda na participação dos modos ativos e coletivos e um aumento da participação dos modos de transporte individual. Essa migração é preocupante, principalmente pelas externalidades já apontadas anteriormente oriundas do uso do modo de transporte individual. A ONU (2011), no Relatório sobre Cidades e Mudanças Climáticas (ONU, 2011), afirma que é possível promover desenvolvimento sustentável e resiliência aos centros urbanos se incentivado o uso do transporte público.

4.2 Estudo de caso: Araraquara – São Paulo

Araraquara situa-se na região central do estado de São Paulo, Brasil, a cerca de 270 km da capital estadual, na latitude 21° 47' 31''S e na longitude 48°10'52'' W, está inserida na mesorregião de Araraquara e na microrregião de mesmo nome (IBGE, 2010b). O município possui uma população estimada em 236.072 habitantes (IBGE, 2020). Com um IDH (Índice de Desenvolvimento Humano) de 0,815 (2010), avaliado como muito alto, o município está em 7° lugar entre os municípios do estado de São Paulo e em 14° entre todos os municípios brasileiros (IBGE, 2010b).

O núcleo urbano de Araraquara teve seu território profundamente marcado pelas grandes propriedades rurais e pela construção de ferrovia no final do século XIX. Nas últimas décadas do século XX, com a aprovação de loteamentos distantes do centro urbano consolidado, houve um espraiamento considerável do perímetro urbano, levando as classes mais pobres a morar em locais afastados e com déficit de infraestrutura (ARARAQUARA, 2014b).

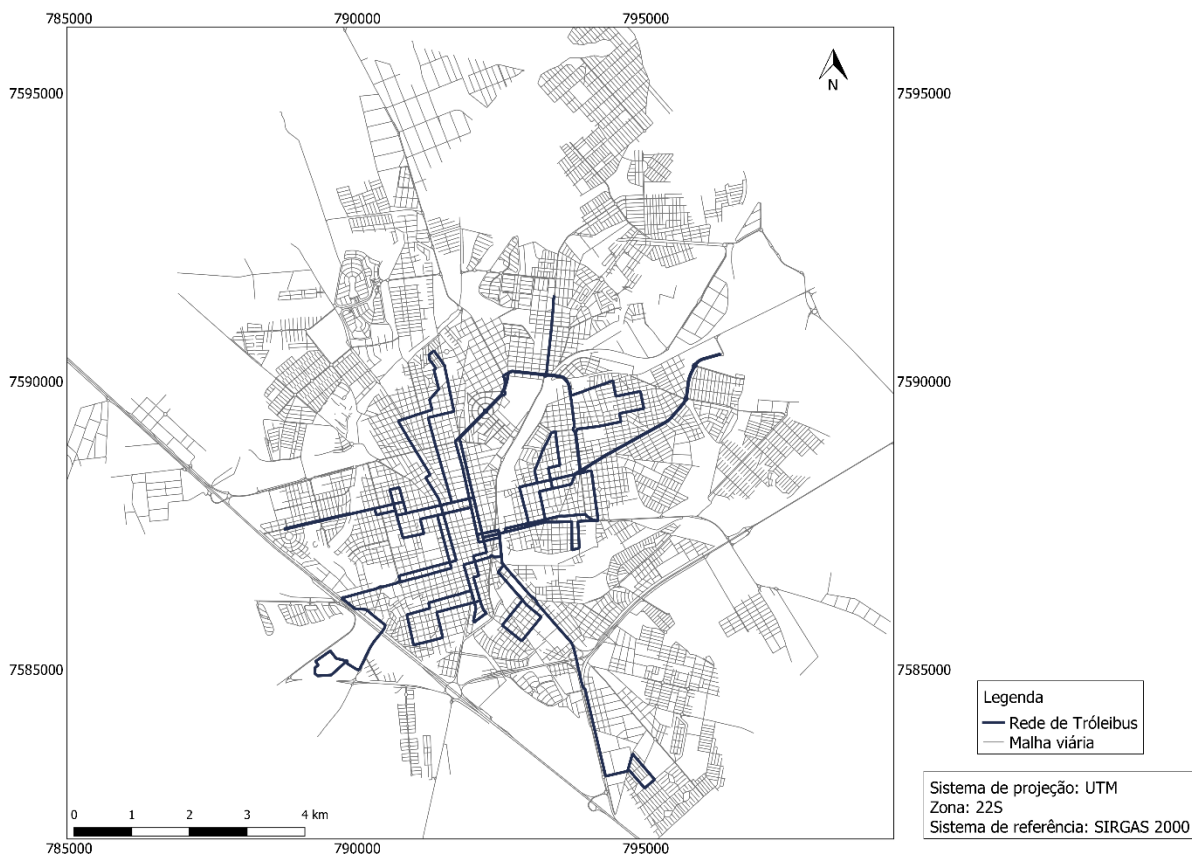
Araraquara é sede de um campus da UNESP (Universidade Estadual Paulista) e também estão presentes a Universidade Paulista (Unip), o Centro Universitário de Araraquara (Uniara), as Faculdades Logatti, o Instituto Savonitti e uma unidade do Centro Federal de Educação Tecnológica (Cefet). Entre os hospitais de destaque da cidade pode-se citar o Hospital São Paulo, a Beneficência Portuguesa e a Santa Casa de Misericórdia. O setor industrial do município está baseado na agroindústria, principalmente no binômio cana e laranja, mas outros setores possuem destaque também, como metal-mecânico, indústria têxtil, tecnologia de informação, aeronáutico e serviços (ARARAQUARA, 2014b).

Em relação aos acessos, a cidade possui um aeroporto estadual (“Bartolomeu Gusmão”), ligação com diversas rodovias importantes do estado e do país, além de abrigar um dos

principais terminais ferroviários de carga do país, ligando regiões produtoras no centro-oeste e exportadoras, como a capital paulista e os portos marítimos (ARARAQUARA, 2014b).

O município de Araraquara, de maneira pioneira, instituiu um sistema de transporte público por ônibus elétricos conhecido como tróleibus. A Companhia Tróleibus Araraquara foi criada em 1959 e os tróleibus estiveram presentes na cidade até a década de 1990, quando em virtude do espraiamento urbano a flexibilização de rotas proporcionada pelos veículos a diesel se tornou mais atrativa (CTA, 2019a). Cabe salientar que algumas linhas de ônibus em operação atualmente se baseiam nas antigas rotas do tróleibus, como a Campus / Vila Xavier, Fonte / Altos da Vila Xavier / Jardim das Estações, Melhado / Imperador, Rodoviária / Santa Cruz, Santana / Pinheirinho, São José / Santa Angelina e Universal / CECAP (PIERINI, 2020). A rede de tróleibus pode ser visualizada na Figura 16.

Figura 16 – Rede de tróleibus de Araraquara - SP



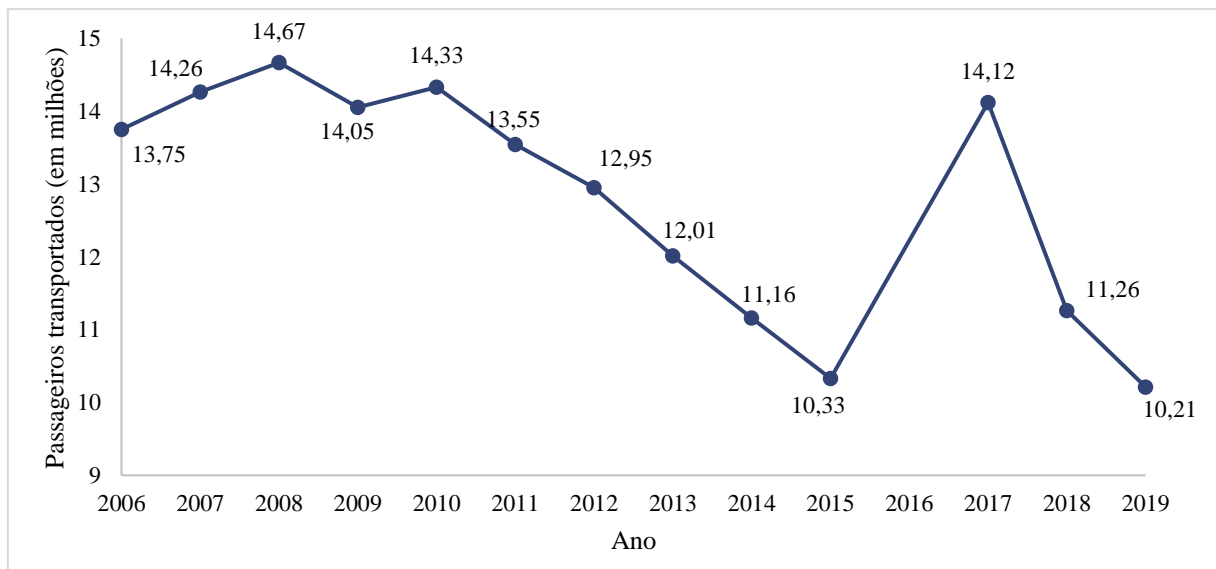
Fonte: elaborado pela autora, adaptado de Pierini (2020).

A Companhia Tróleibus Araraquara continuou como operadora do sistema de transporte público coletivo até 2016, quando a prefeitura da cidade instituiu a CTA - Controladoria do Transporte de Araraquara através da Lei Ordinária nº8.680 (ARARAQUARA, 2016). Vinculada à Secretaria de Trânsito e Transportes, a função da CTA

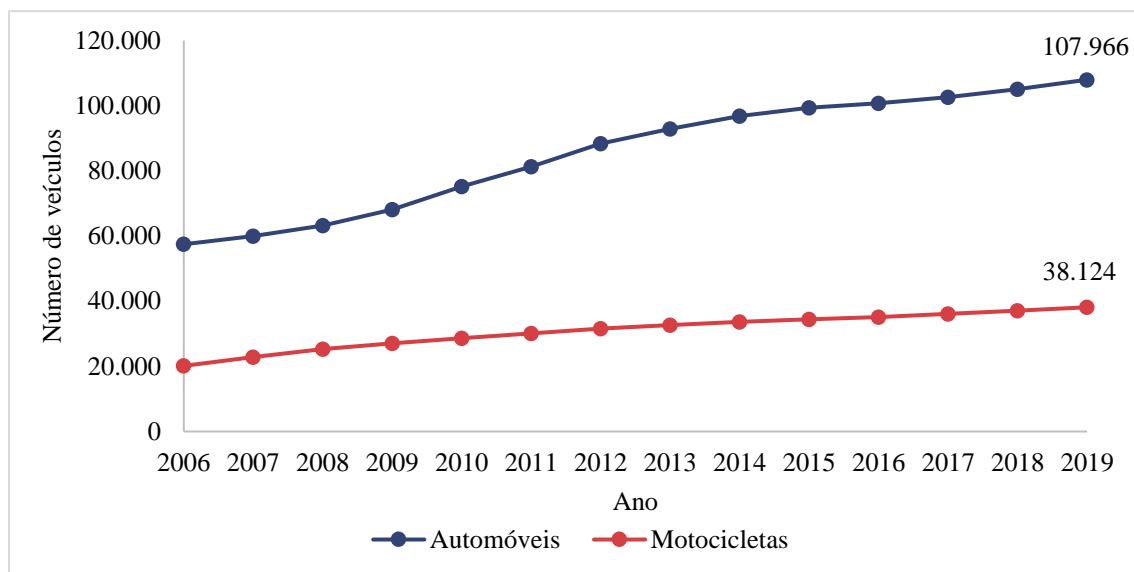
é regulamentar e fiscalizar os serviços públicos de transporte público urbano. No mesmo ano, a operação do sistema entrou em regime de concessão por 20 anos. Atualmente, a Viação Paraty e a Viação Cruz prestam os serviços de transporte público por ônibus na cidade (CTA, 2019a).

Os dados de passageiros transportados, apresentados na Figura 17, confirmam a tendência de queda apresentada anteriormente nas cidades médias. Em 2019, o volume de passageiros transportados foi o menor desde 2006. Os dados de 2016 não estão completos, possivelmente por ser o ano de transição da operação dos serviços. Além da queda de demanda do transporte público, houve aumento da taxa de motorização individual. De 2010 a 2019, a frota de veículos aumentou 43,54% e a de motocicletas, 33,19%. Em 2019, para cada 2,19 habitantes, havia 1 veículo no município. Para cada 6,19 habitantes, 1 motocicleta. Os números de 2010 eram de 2,77 e 2,19, respectivamente. Nota-se que o crescimento da frota é muito superior ao crescimento populacional estimado em 13,14% (DENATRAN, 2020; IBGE, 2010b; IBGE, 2020).

Figura 17 - Passageiros transportados no sistema de transporte público por ônibus em Araraquara anualmente no período de 2006 a 2019



Fonte: elaborado pela autora, adaptado de CTA – Controladoria do Transporte de Araraquara (2019b, 2020).

Figura 18 – Frota de veículos e motocicletas de Araraquara no período de 2006 a 2019

Fonte: elaborado pela autora, adaptado de DENATRAN (2020).

4.3 Mapas de critérios para aplicação do método AHP

Os dados primários dessa etapa foram obtidos junto ao IBGE (IBGE, 2010b), à Prefeitura de Araraquara e à CTA - Controladoria do Transporte de Araraquara. Para alguns critérios, como os Polos Geradores de Tráfego, os dados foram confirmados através do Google Maps. A seguir, são apresentados os mapas de cada critério utilizado no método, bem como as especificidades de cada um.

4.3.1.1 População

Os dados referentes à população foram obtidos do Censo 2010 (IBGE, 2010b) e, para os setores consolidados da cidade, foi estimada para 2020 através de progressão geométrica. O crescimento médio da cidade foi de 13,14% e aplicando esse fator de crescimento nesses setores, foi obtido o valor de 228.012 habitantes, faltando, portanto, 8.060 moradores para completar a estimativa do IBGE para 2019, que é de 236.072 habitantes (IBGE, 2020). Estes 8.060 habitantes foram alocados nos condomínios e loteamentos construídos e consolidados após 2010. Devido à expansão urbana, principalmente periférica, foi necessária uma atualização dos setores censitários e uma estimativa da população residente nesses locais, cujo processo é escrito detalhadamente no Apêndice A. Esse procedimento foi aplicado em áreas consideradas rurais no Censo de 2010, mas que apresentaram urbanização significativa desde então. A Figura

19 apresenta a estimativa para 2020 de população residente nos setores censitários consolidados e nos loteamentos criados após 2010.

Figura 19 – População residente estimada para 2020 nos setores censitários e nos loteamentos novos de Araraquara - SP



Fonte: elaborado pela autora (2020).

Para os mapas de população e densidade, cuja origem foram os mapas disponibilizados pelo IBGE (IBGE, 2010b), compatíveis com escala 1:250.000, foi necessário um ajuste na georreferenciação dos mesmos. Após inserção dos arquivos do IBGE sobre a malha viária disponibilizada pela prefeitura, foram encontrados deslocamentos superiores a 400 metros entre os setores censitários e os eixos da malha viária. Mesmo nas regiões centrais foram encontrados deslocamentos em torno de 200 metros. Apesar dos deslocamentos maiores estarem localizados nos extremos da cidade e serem aceitáveis para a escala na qual o IBGE apresenta os dados, os mesmos foram considerados excessivamente grandes para a escala deste projeto. Para tentar minimizar o erro de georreferenciamento, foi utilizado o complemento *VectorBender* para QGIS. O complemento ajusta os elementos de uma camada vetorial a partir de pontos determinados. Para este trabalho, foi utilizado o ajuste por 3 pontos, sendo selecionados um ponto no extremo norte, um no oeste e um no sul. Mesmo após os ajustes, as divisões dos setores

não ficaram perfeitamente alinhadas com a malha viária, porém os deslocamentos caíram para cerca de 100 metros em pontos nos extremos da cidade e para cerca de 60 metros ou menos nas regiões centrais.

4.3.1.2 Densidade

Os dados de densidade demográfica foram obtidos a partir das características dos setores censitários (IBGE, 2010b) e dos loteamentos novos, conforme descrito no Apêndice A. A população estimada para cada setor foi dividida pela respectiva área em hectare. A Figura 20 apresenta os valores obtidos de densidade em habitantes/hectare (hab./ha).

Figura 20 – Densidade habitacional (hab./ha) estimada para 2020 nos setores censitários e nos loteamentos novos de Araraquara - SP



Fonte: elaborado pela autora (2020).

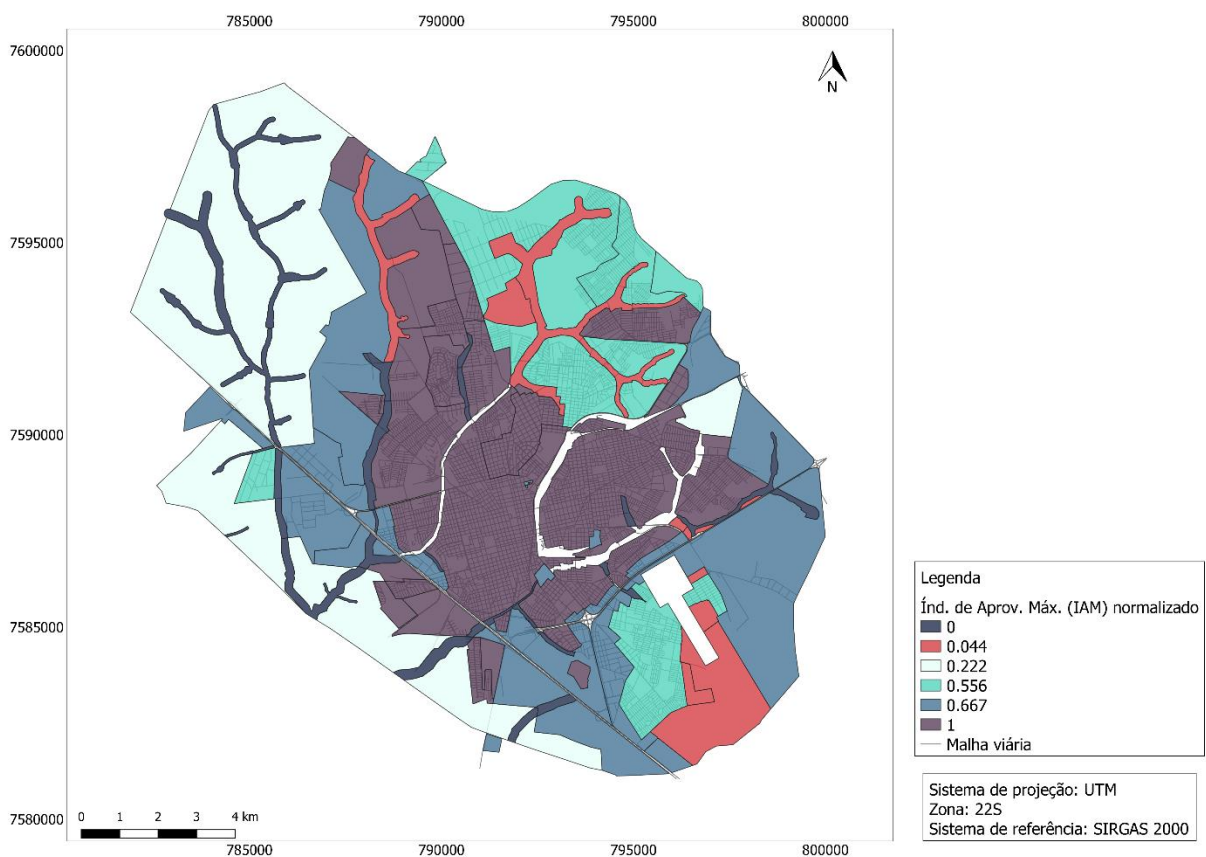
4.3.1.3 Índice de aproveitamento

A legislação brasileira relativa ao desenvolvimento urbano designa que os municípios com mais de 20 mil habitantes elaborem um plano diretor, no qual deve existir regulamentação do uso do solo, tal como o tipo de uso e a possibilidade de verticalização em determinadas áreas.

É comum os municípios relacionarem permissões e restrições a índices construtivos, onde valores elevados representam uma maior possibilidade de densificação na área, orientando o crescimento das cidades (Brasil, 2001). O Índice de Aproveitamento Máximo (I_{AM}) é um destes índices e é utilizado neste trabalho.

De acordo com o plano diretor de Araraquara, o zoneamento da cidade é composto por ZAMB – Zonas Ambientais e ZEUS - Zonas de Estruturação Urbana Sustentável, cada uma com subdivisões com usos e índices de aproveitamento determinados (ARARAQUARA, 2014a). A descrição detalhada de cada uma das zonas, dos índices de aproveitamento e a delimitação espacial de cada zona são apresentados no Apêndice B. Na Figura 21 é apresentado o mapa de acordo com os valores de Índice de Aproveitamento Máximo (I_{AM}) normalizado.

Figura 21 – Mapa de zoneamento urbano de acordo com o Índice de Aproveitamento Máximo (I_{AM}) normalizado



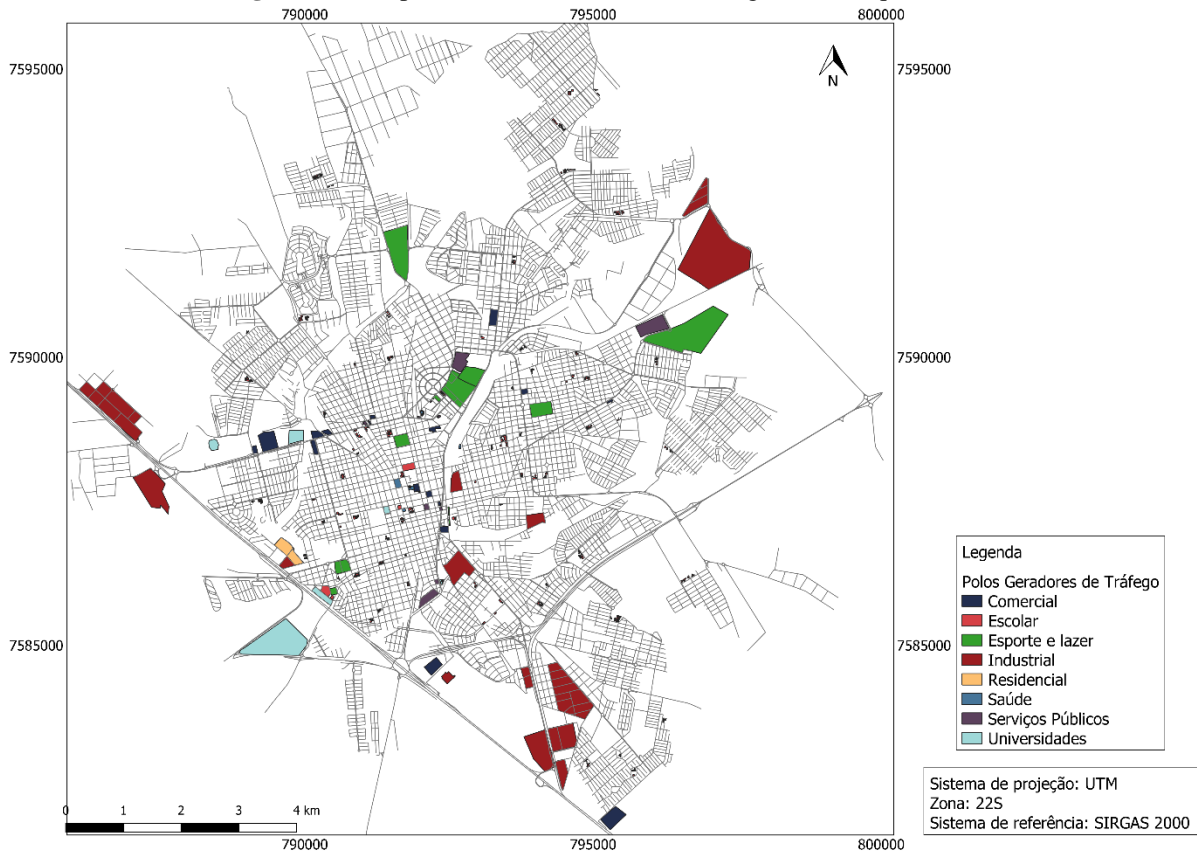
Fonte: elaborado pela autora, adaptado de Araraquara (2014a).

4.3.1.4 Polos Geradores de Tráfego

O mapeamento dos PGT (Polos Geradores de Tráfego) foi realizado através do Google Maps® e do Mapa de equipamentos urbanos do Plano Diretor de Araraquara (ARARAQUARA, 2014a). Foram levantados centros comerciais e industriais, escolas e

universidades, hospitais, locais de prestação de serviços públicos e administrativos, além de espaços de esporte e lazer (Figura 22).

Figura 22 – Mapa dos Polos Geradores de Tráfego de Araraquara - SP



Fonte: elaborado pela autora, adaptado de Araraquara (2014a).

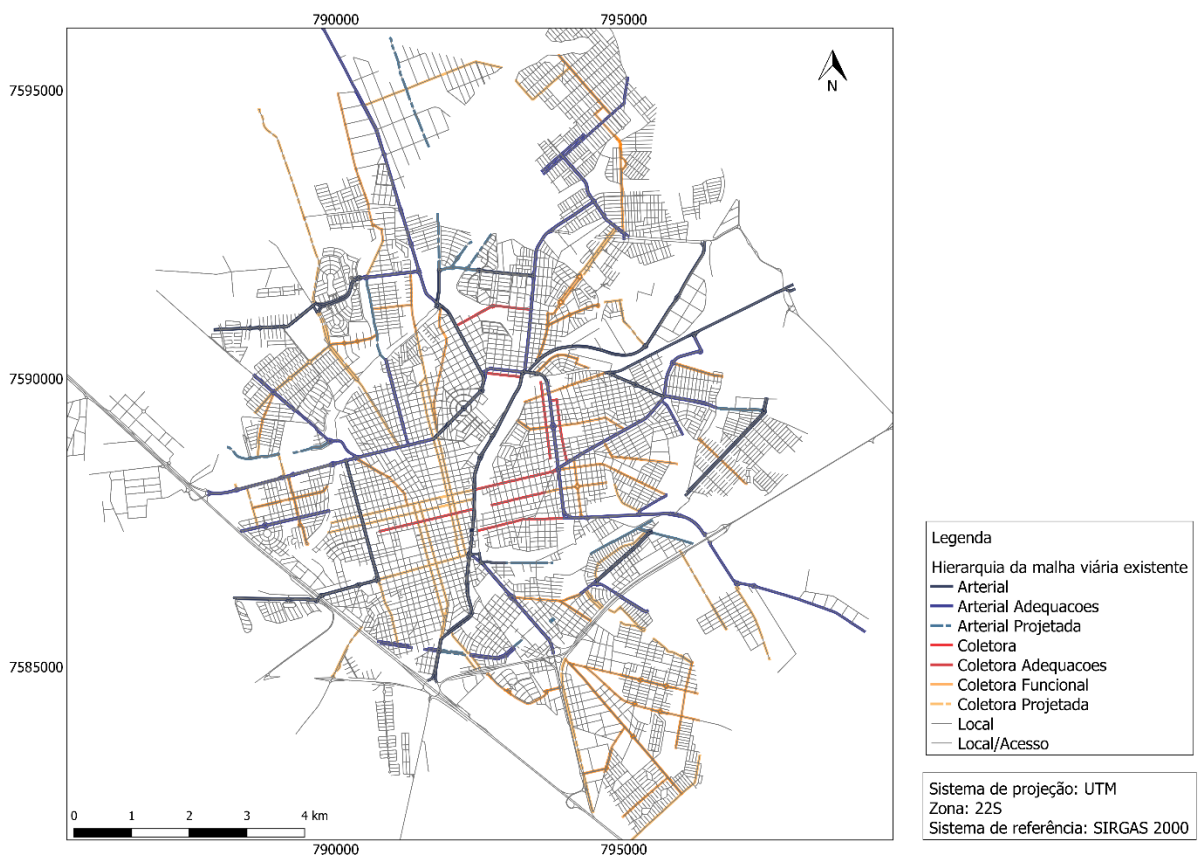
4.3.1.5 Hierarquia viária

A hierarquia viária é um critério determinante para a implantação de faixas exclusivas de ônibus por ser um fator limitante de acordo com o Plano Diretor do município. Conforme apresentado no Quadro 4, apenas as vias coletoras e arteriais podem ser utilizadas para transporte público. Apesar disso, foi constatado tráfego de ônibus em vias classificadas atualmente como locais. Ainda, em virtude da especificidade da rede de transporte público do município, com grande circulação em vias atualmente classificadas como coletoras, adotou-se o mesmo grau de prioridade para vias arteriais e coletoras. A Figura 23 apresenta a espacialização da hierarquia viária no município.

Quadro 4 – Classificação funcional viária de acordo com o Plano Diretor de Araraquara - SP

Tipo de via	Tipologia	Função	Utilização
Vias regionais	Rodovias e Vicinais	Ligações regionais e interurbanas	Transporte passageiros e cargas
Vias arteriais	Radiais e Perimetrais	Ligações Intraurbanas e Áreas Transição	Transp. coletivo, carga pesada e veicular individual
Vias coletoras	Distribuição	Conexão e Distribuição Tráfego local a Vias Estruturais	Transp. coletivo, carga pesada e veicular individual
Vias locais	Acesso local bairros residenciais e comerciais	RPB	Transporte veicular individual
Vias de acesso	Circulação interna em condomínios horizontais de casas	Acesso unidades individuais	Transporte veicular individual

Fonte: Adaptado do Plano Diretor do Município de Araraquara (2014a).

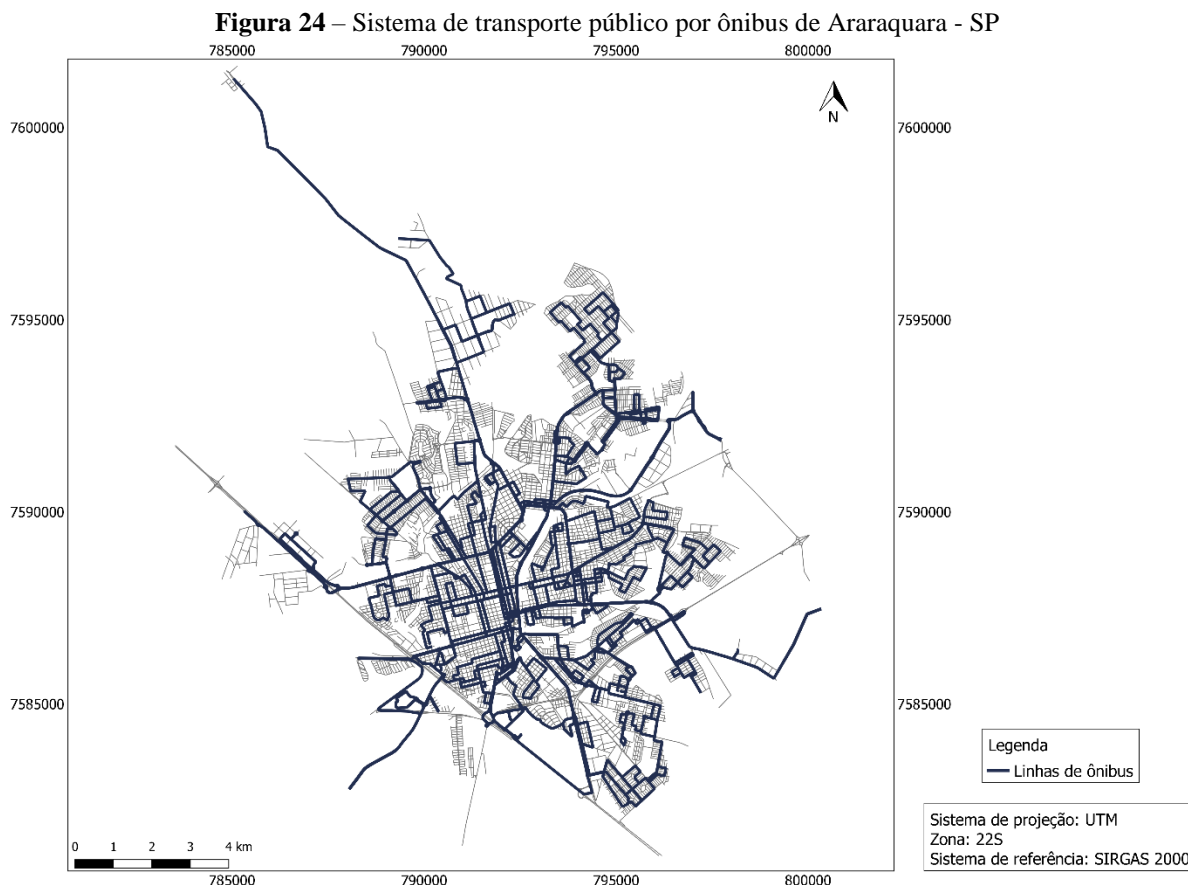
Figura 23 – Vias arteriais e coletoras de Araraquara - SP

Fonte: elaborado pela autora, adaptado de Araraquara (2014a).

4.3.1.6 Rede de transporte público por ônibus

A rede de transporte público por ônibus de Araraquara - SP é operada atualmente sob regime de concessão por duas empresas, Empresa Cruz e Viação Paraty, num total de 38 linhas. O sistema possui linhas diametrais, radiais e circulares, sendo 4 delas com funcionamento durante a madrugada (Corujões). Uma lista das linhas com respectivas informações é apresentada no Apêndice C, enquanto que a Figura 24 mostra a espacialização da rede na malha

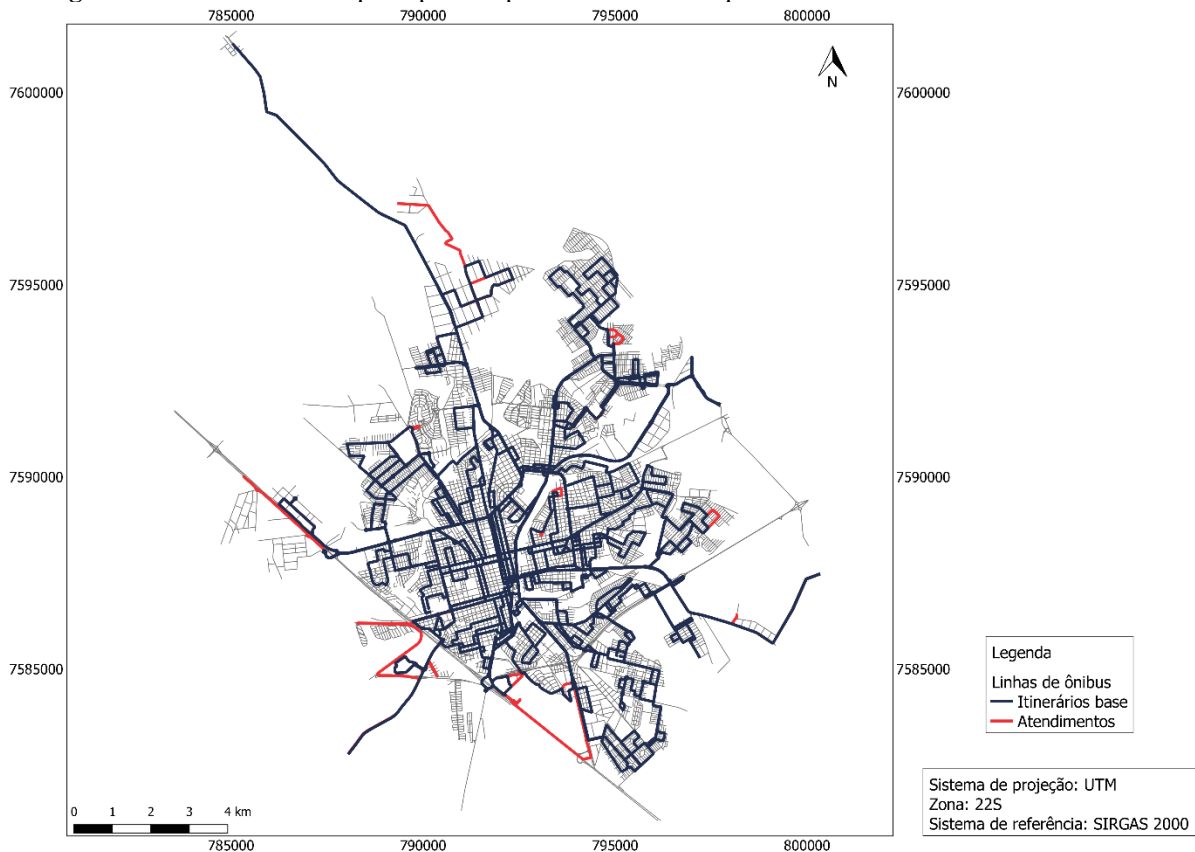
viária da cidade. Os itinerários das linhas foram obtidos no site do CAT – Consórcio Araraquara de Transportes (2020).



Fonte: elaborado pela autora, adaptado de CAT – Consórcio Araraquara de Transportes (2020).

A maioria das linhas realiza atendimentos em alguns horários do dia. Atendimentos são variações de itinerário que passam em ruas diferentes ou dão uma volta maior para abranger outro bairro. Cabe destacar que a operação através de atendimentos pode causar confusão para os usuários, uma vez que estes podem não estar cientes das mudanças de tabela horária ou de itinerário. Ainda, essa forma de operação restringe o acesso ao sistema em alguns pontos da cidade, conforme pode ser observado na Figura 25, que mostra algumas áreas nos extremos do perímetro urbano da cidade que são atendidas apenas dessa maneira.

Figura 25 – Sistema de transporte público por ônibus de Araraquara com itinerários base e atendimentos



Fonte: elaborado pela autora, adaptado de CAT – Consórcio Araraquara de Transportes (2020).

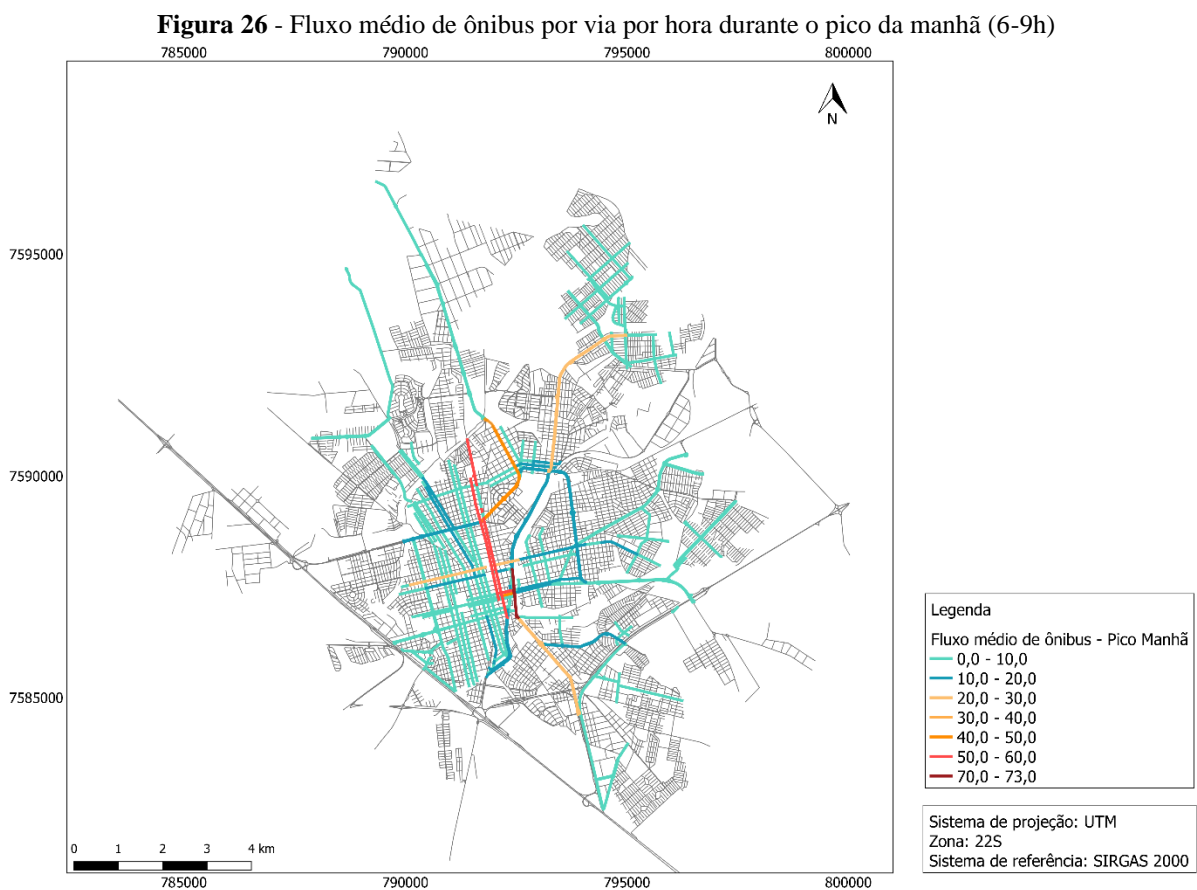
4.3.1.7 Fluxo de ônibus por via por hora

O fluxo de ônibus por via foi calculado a partir do itinerário descrito no site do CAT – Consórcio Araraquara de Transportes (2020). Foram catalogados todos os logradouros pelos quais cada linha passava, foram feitas correções do tipo “Avenida” para “Av.”, depois somadas todas as ocorrências por linha e por horário, gerando o fluxo total no logradouro por dia. Após determinar o fluxo total, foi feita a média simples para determinar o fluxo médio horário. Os valores foram agrupados por períodos do dia, considerando período total de operação (0-23h), horário comercial (6-20h) e pico da manhã (6-9h) e da tarde (17-20h). O Pico da Manhã (6-9h) é o que concentra o maior volume de veículos, e é, portanto, o que vai ser utilizado no método AHP, justamente por ser o mais crítico.

Cabe salientar que através desse método, o fluxo é considerado para todo o logradouro e não apenas trechos. É possível que trechos de um mesmo logradouro tenham mais fluxo que outros, e, portanto, a trechos com menor fluxo foram atribuídos valores inflados. Entretanto, como a soma foi feita por logradouros e não por trechos, a obtenção dessa informação de maneira mais precisa tomaria um tempo desproporcional ao objetivo do trabalho. Ainda,

considerando a finalidade deste trabalho, que é estabelecer corredores prioritários de transporte, se faz necessária a continuidade das condições da via, justificando novamente a adoção dos valores de fluxo obtidos pelo site, mesmo que haja pequenas alterações em alguns trechos.

Na espacialização dos dados no software QGIS, apresentada Figura 26, foram mantidos os dados de fluxo apenas nos trechos onde há circulação de ônibus acima de seis veículos por hora.



Fonte: elaborado pela autora, adaptado de CAT – Consórcio Araraquara de Transportes (2020).

5. RESULTADOS

Neste capítulo são discutidos os resultados referentes a todas as etapas metodológicas deste trabalho. Os resultados são apresentados de maneira sequencial, com o refinamento da rede através do método AHP, a construção da rede simplificada para otimização, a otimização dessa rede e a geoespacialização dos resultados computacionais.

5.1 Resultado AHP

5.1.1 Matriz dos pesos dos critérios

Todas os pesos dos critérios obtidos através de entrevistas são apresentados na Tabela 4, bem como os valores de CR, sendo estes todos menores que 0,10 e garantindo a confiança estatística do método AHP. Os pesos finais aplicados foram obtidos através da média dos pesos obtidos nas entrevistas e são apresentados na Tabela 5, onde os critérios estão ordenados do mais para o menos importante.

Tabela 4 – Pesos dos critérios do método AHP obtidos em entrevistas

Critério / Entrevista	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
População	0,257	0,132	0,235	0,034	0,202	0,157	0,314	0,280
Densidade	0,190	0,278	0,135	0,127	0,117	0,215	0,314	0,224
Índice de aproveitamento	0,065	0,067	0,091	0,047	0,044	0,116	0,029	0,174
PGTs	0,153	0,253	0,152	0,217	0,313	0,215	0,159	0,129
Hierarquia viária	0,066	0,090	0,326	0,187	0,025	0,082	0,033	0,095
Circulação de ônibus atualmente	0,068	0,037	0,036	0,212	0,053	0,097	0,076	0,051
Fluxo de ônibus por via/h	0,203	0,144	0,025	0,177	0,245	0,116	0,076	0,046
Total	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
CR	0,062	0,070	0,082	0,056	0,123	0,048	0,038	0,090

Fonte: elaborado pela autora (2020).

Tabela 5 – Pesos utilizados e ordem de importância de cada critério no método AHP

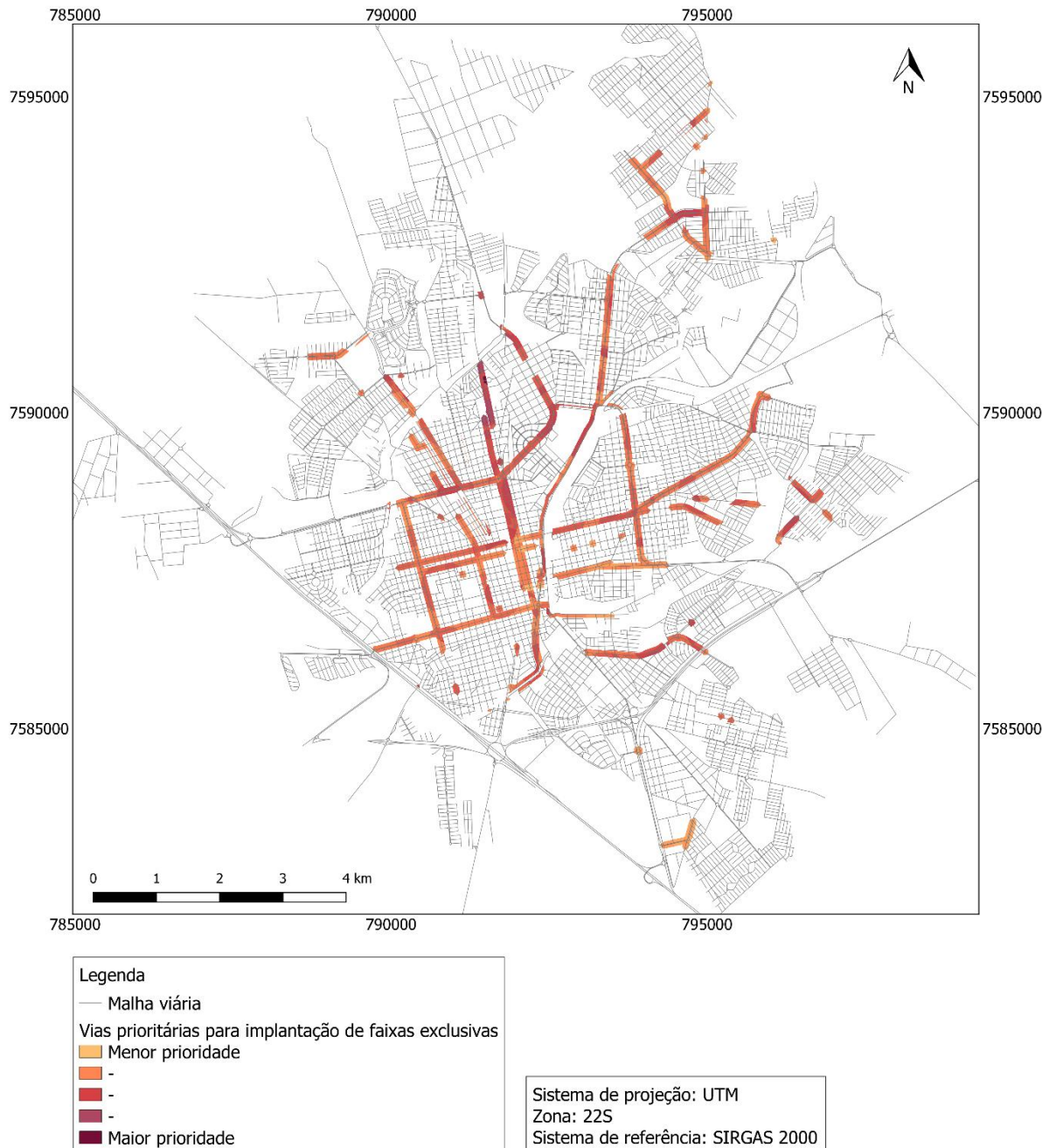
Critério / Entrevista	Média	Ordem de importância
População	0,201	1
Densidade	0,200	2
PGTs	0,199	3
Fluxo de ônibus por via/h	0,129	4
Hierarquia viária	0,113	5
Índice de aproveitamento	0,079	6
Circulação de ônibus atualmente	0,079	7

Fonte: elaborado pela autora (2020).

5.1.2 Mapa de prioridade do método AHP

O método AHP apresenta como resultado os eixos prioritários de intervenção, sendo estes todos os destacados na Figura 27. Ressalta-se que quanto maior a pontuação do eixo no método AHP, mais escura é a representação no mapa.

Figura 27 – Resultado do método AHP: áreas prioritárias para implantação de faixas exclusivas de ônibus em Araraquara - SP

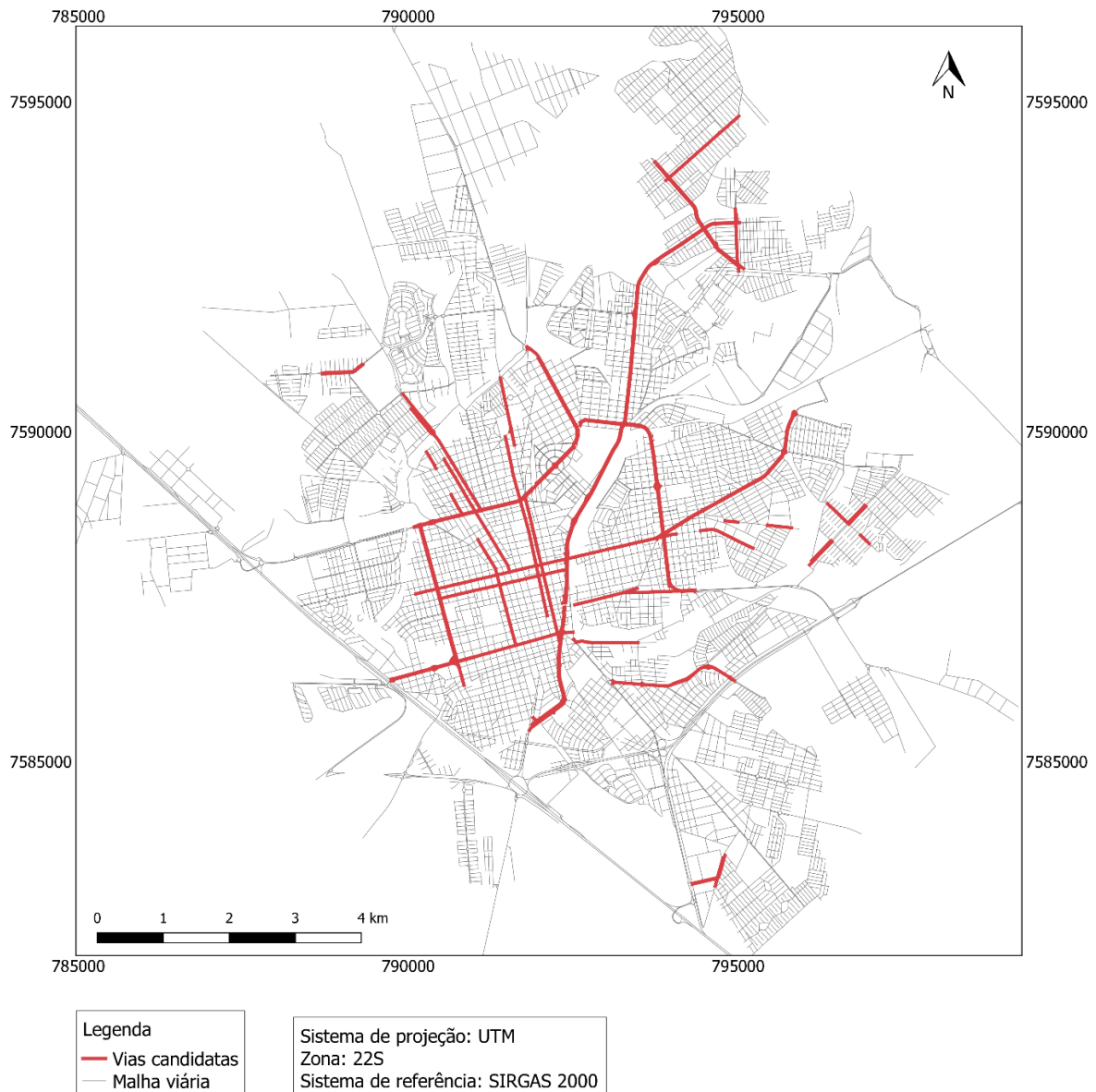


Fonte: elaborado pela autora (2020).

5.1.3 Rede simplificada - vias candidatas a receber implantação de faixas exclusivas

Conforme descrito no item 3.2.4, foi aplicado um buffer nos arquivos de critérios relacionados aos eixos viários. Para obter o conjunto de vias candidatas a receber implantação de faixas exclusivas, o resultado do método AHP foi poligonizado, i.e., transformado do formato raster para o formato vetor. As vias candidatas são apresentadas na Figura 28 e uma lista das mesmas é encontrada na Tabela 6. Nas vias onde havia circulação de ônibus e dois trechos separados apareceram como prioritários no AHP, foram consideradas em sua totalidade como prioritárias a fim de manter a continuidade da faixa exclusiva, caso implantada.

Figura 28 – Vias candidatas para implantação de faixas exclusivas de ônibus em Araraquara - SP



Fonte: elaborado pela autora (2020).

Tabela 6 - Lista de vias candidatas à implantação de faixas exclusivas de ônibus em Araraquara - SP

Logradouro	Hierarquia
Albert Einstein (Dr.)	Arterial
Alberto Santos Dumont	Coletora
América	Coletora
Antonio Prado	Local
Armando De Salles Oliveira	Coletora
Augusto Bernardi	Arterial
Barroso	Coletora
Bento De Abreu	Arterial
Carlos Gomes	Local
Carmello Quatrocchi	Local
Castro Alves	Arterial
Edson Baccarin (Dr.)	Coletora
Expedicionários Do Brasil	Coletora
Francisco Vaz Filho	Arterial
Galileu Galilei	Coletora
Joao Batista De Oliveira	Arterial
Joaquim Vieira Dos Santos	Coletora
Jose Bonifácio	Coletora
Jose Logatti (Dr.)	Arterial
Jose Palamone Lepre	Coletora
Luiz Alberto	Local
Marginal Paulista	Local
Maria Antonia Camargo De Oliveira	Arterial
Mario Opice (Dr.)	Coletora
Mauricio Galli	Arterial
Napoleão Selmi Dei	Arterial
Pablo Picasso	Arterial
Padre Antonio Cezarino	Coletora
Padre Francisco Colturato	Arterial
Padre Manoel Nobrega	Arterial
Paulista	Arterial
Presidente Vargas	Coletora
Rafael Medina	Coletora
Roberto De Jesus Affonso	Coletora
Santo Antonio	Coletora
São Bento	Coletora
Sete De Setembro	Arterial
9 de julho	Coletora

Fonte: elaborado pela autora (2020).

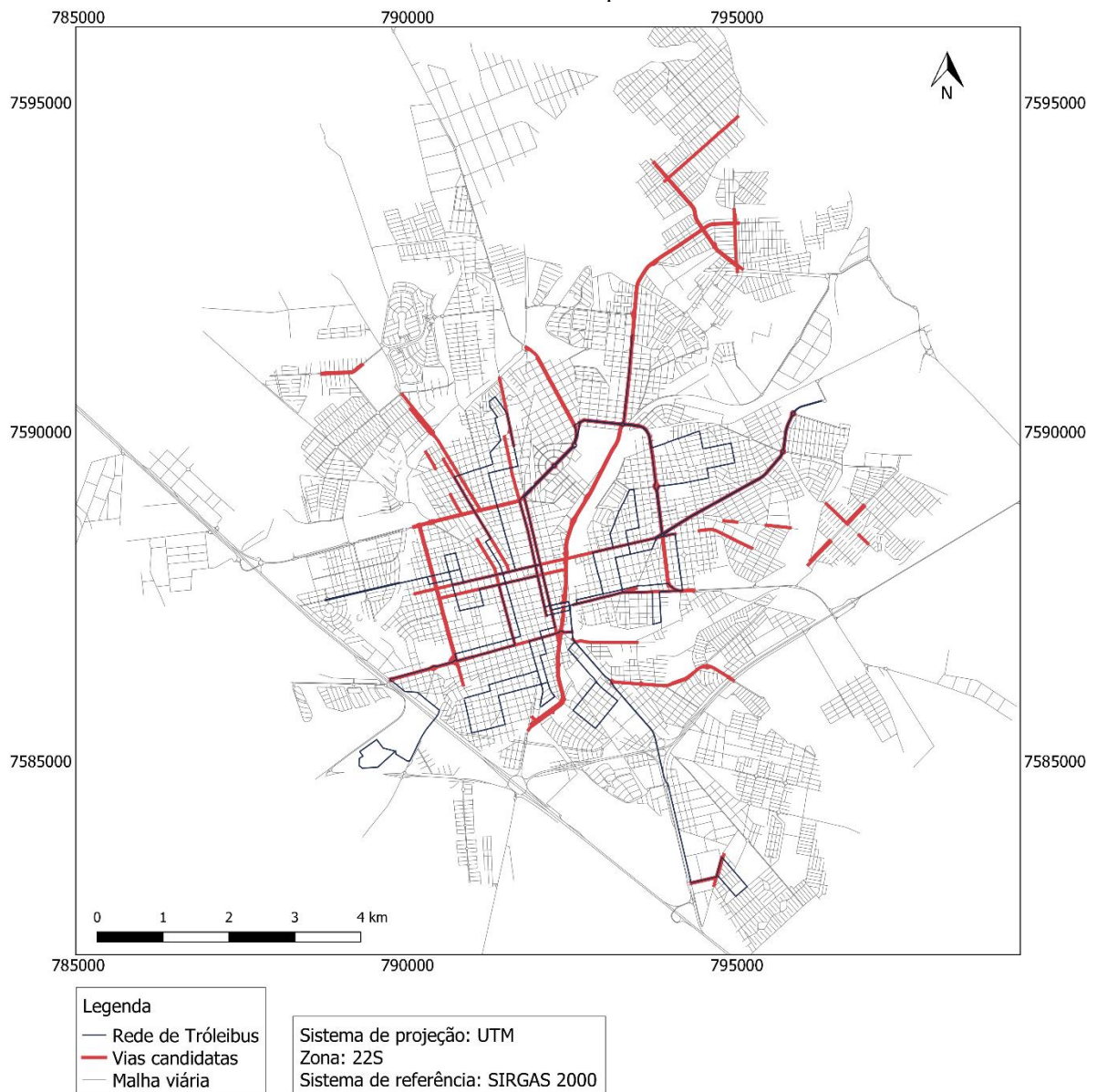
5.1.4 Considerações adicionais sobre a rede simplificada

As vias candidatas resultantes do AHP coincidem, em sua maioria, com vias onde há elevado fluxo de ônibus, mesmo este sendo o quarto critério em grau de importância na matriz do método. As vias também correspondem a eixos tradicionais de transporte na cidade e formam uma rede conectada, característica desejada em redes de transporte, com exceção de alguns trechos pequenos em regiões periféricas. Na Figura 29 é possível observar como a

seleção de vias deste trabalho se assemelha à rede de tróleibus, que operaram na cidade até o fim da década de 1990. Pode-se concluir a partir disso, que de fato a cidade se desenvolveu em torno desse sistema de transporte, uma vez que 20 anos depois de sua desinstalação, as vias por onde o tróleibus passava ainda aparecem como prioritárias para implantação de faixas exclusivas.

É possível ressaltar também que as vias selecionadas se localizam em zonas populosas ou onde se concentram as maiores densidades da cidade. Entretanto, as vias selecionadas não são classificadas apenas como arteriais e coletoras, vias locais também entraram na seleção.

Figura 29 – Comparação da seleção de vias candidatas para implantação de faixas exclusivas de ônibus e a rede de tróleibus de Araraquara - SP

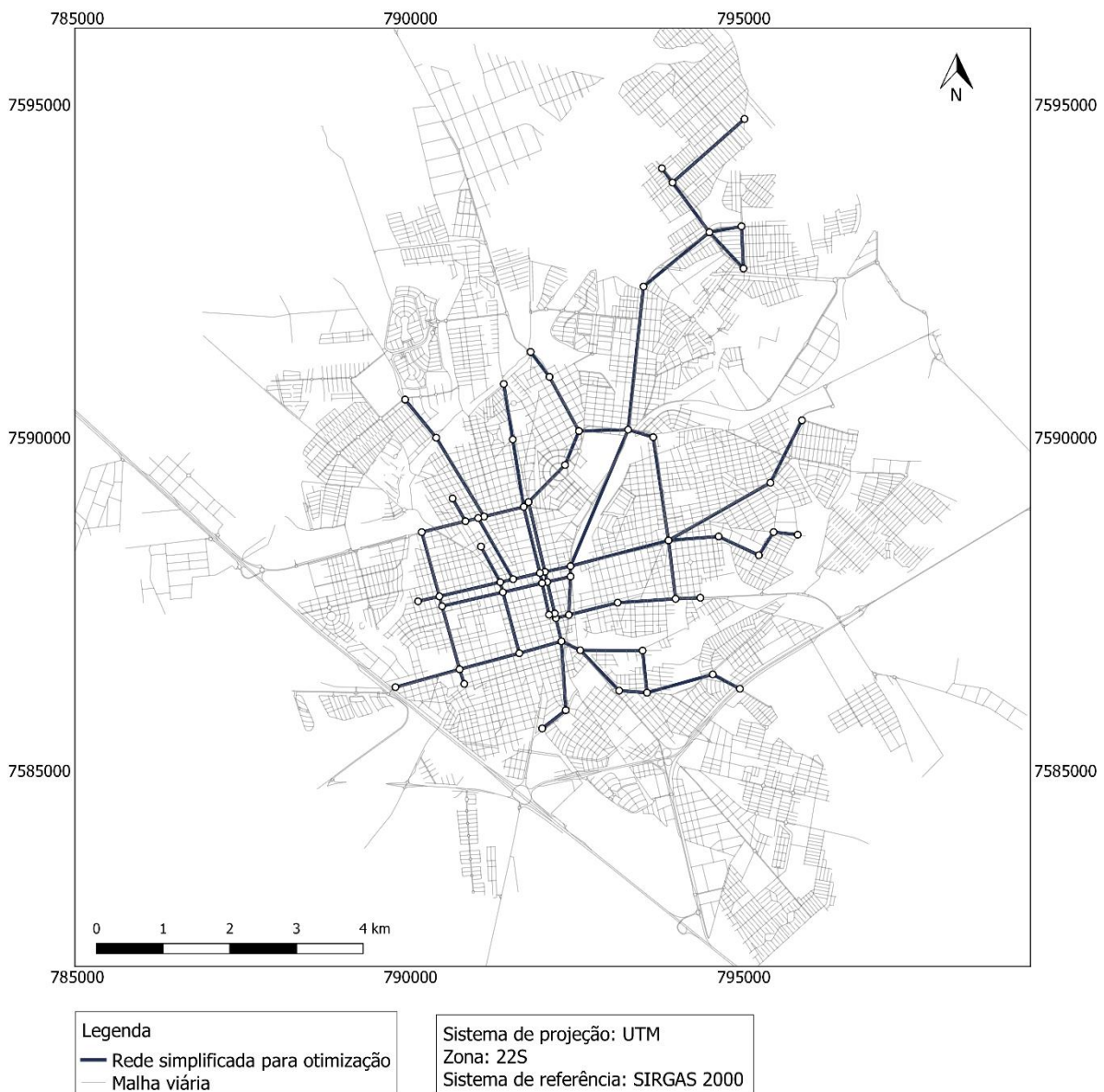


Fonte: elaborado pela autora (2020).

5.2 Rede simplificada para método de otimização

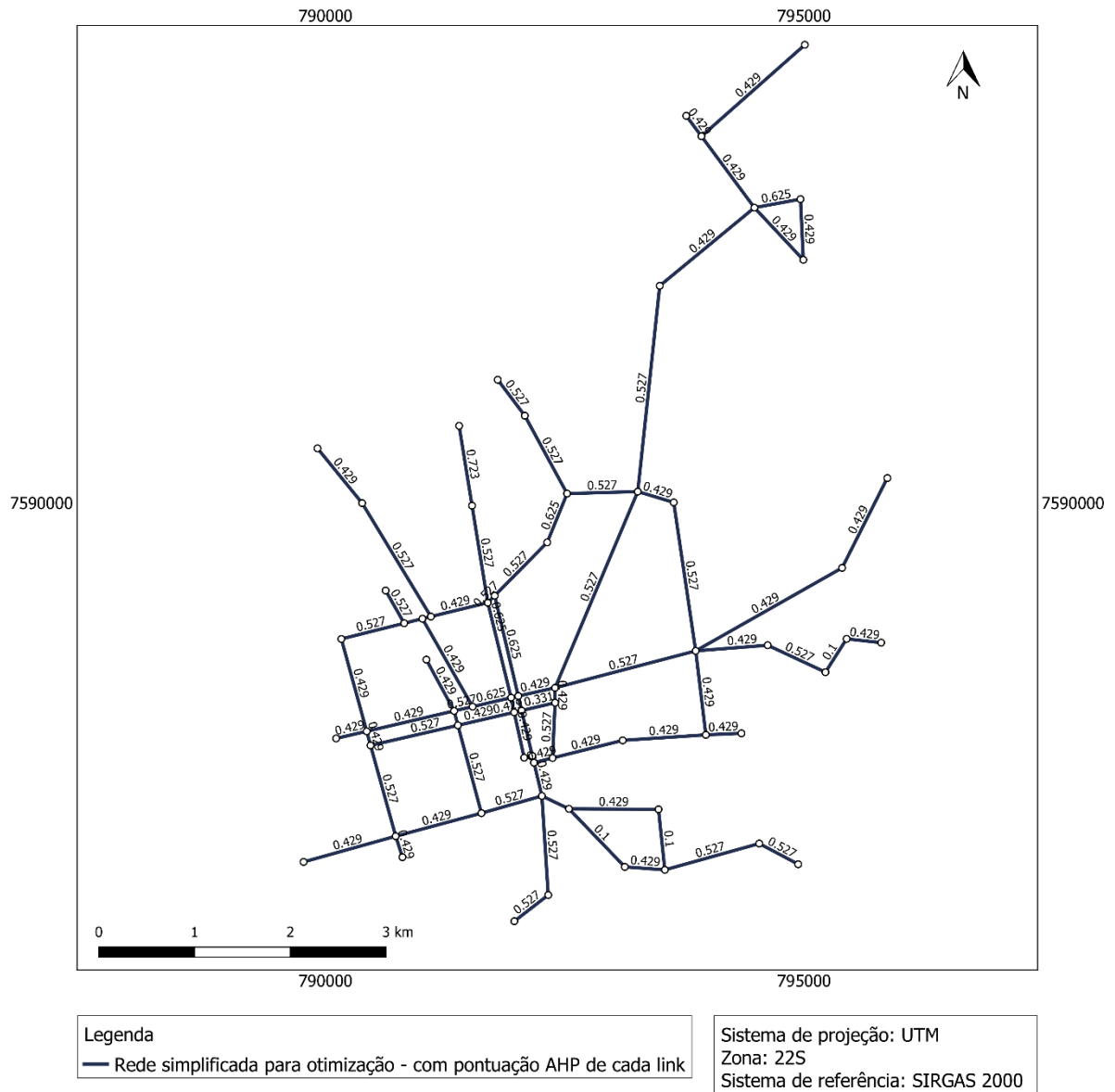
Depois de realizados os ajustes informados no item 3.4, a rede para otimização foi simplificada para 76 *links*, conforme apresentado na Figura 30. Na Figura 31 são apresentadas as pontuações AHP e na Figura 32, as distâncias de cada *link*. Esta é a rede de otimização utilizada como dado de entrada no modelo de otimização. No Apêndice D são apresentados os dados referentes a cada *link* da rede.

Figura 30 – Rede simplificada de Araraquara - SP para otimização



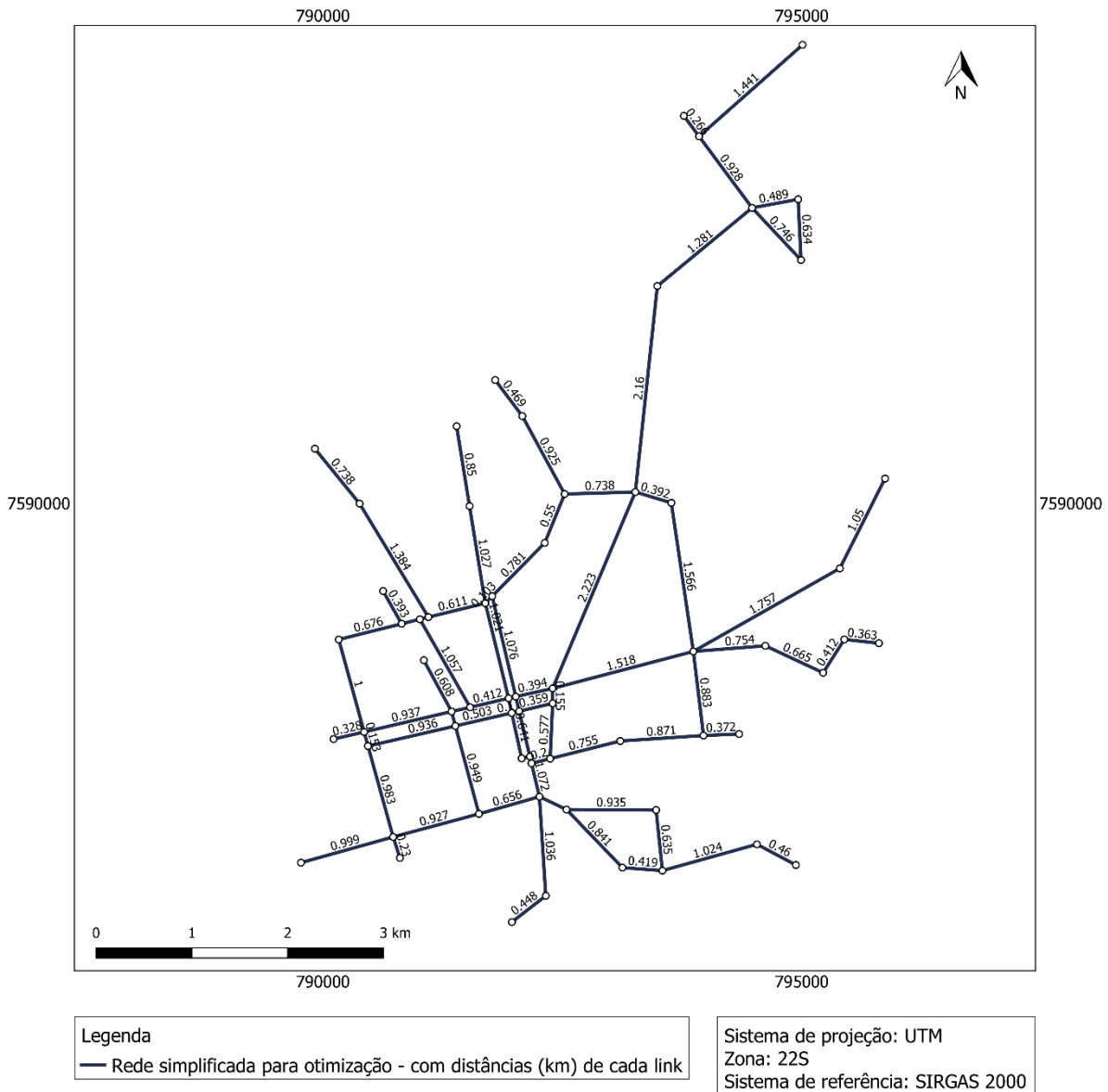
Fonte: elaborado pela autora (2021).

Figura 31 – Rede simplificada de Araraquara - SP para otimização com pontuação AHP de cada *link*



Fonte: elaborado pela autora (2021).

Figura 32 - Rede simplificada de Araraquara - SP para otimização com distância (em km) de cada *link*



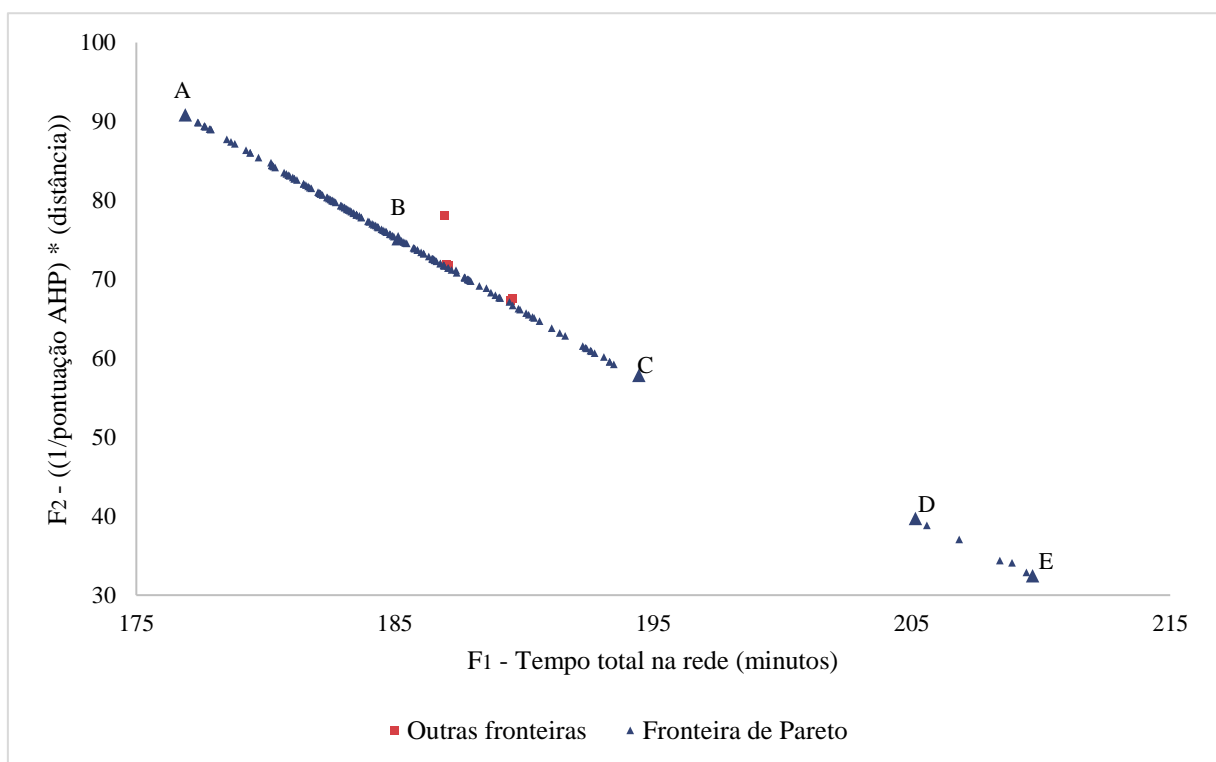
Fonte: elaborado pela autora (2021).

5.3 Resultados do modelo de otimização – Fronteira de Pareto

O comprimento total considerado da rede simplificada é de 54,03 quilômetros, ou seja, essa é a quilometragem máxima admitida no problema para implantação de faixas exclusivas. Se nenhuma faixa exclusiva é implantada, o tempo de circulação total na rede é de 231,56 minutos. Se todos os *links* recebem faixa exclusiva, o tempo de circulação total na rede é de 165,40 minutos. Salienta-se que todo o processo de otimização busca as melhores alternativas entre esses dois extremos, i.e., é um processo de *trade off* entre essas duas variáveis, distância e tempo, ou seja, aumentando um, o outro diminui.

Na Figura 33 são apresentados os indivíduos da geração 2000. Como o procedimento do algoritmo NSGA-II para pois o número de gerações foi atingido, não são realizados os procedimentos de seleção para a próxima geração e, portanto, a população total de indivíduos na figura é de $2N$. Percebe-se que a fronteira de Pareto assume um comportamento similar ao de uma reta e há uma lacuna entre os valores 195 e 205 de F_1 e 40 e 55 de F_2 . A evolução dos indivíduos em cada geração pode ser observada no Apêndice E, que contém as fronteiras de Pareto de todas as gerações múltiplas de cem (0 a 1900).

Figura 33 - Indivíduos da geração 2000, fronteira de Pareto e demais fronteiras



Fonte: elaborado pela autora (2021).

O valor mínimo para a função objetivo 1, i.e., tempo total de circulação na rede, obtido nos indivíduos na fronteira de Pareto foi de 176,90 minutos, ao qual estão associados o valor de 90,83 na função objetivo 2 e 44,64km de faixas exclusivas (Ponto A da Figura 33). Quando comparado com a opção extrema de implantação de faixas exclusivas em todos os *links* da rede, há um aumento de tempo total de 11,50 minutos e um decréscimo de 9,39km de faixas exclusivas implantadas. Se comparado com a opção de não implantação de faixas exclusivas, o tempo total na rede é reduzido em 54,66 minutos, cerca de 23,6%.

O valor máximo para a função objetivo 1 obtido nos indivíduos na fronteira de Pareto foi de 209,68 minutos, ao qual estão associados o valor de 32,44 na função objetivo 2 e 17,87km de faixas exclusivas (Ponto E da Figura 33). Quando comparado com a opção de implantação

de faixas exclusivas em todos os *links* da rede, há um aumento de tempo total de 44,28 minutos e um decréscimo de 36,16km de faixas exclusivas implantadas. Se comparado com a opção de não implantação de faixas exclusivas, o tempo total na rede é reduzido em 21,88 minutos, cerca de 9,45%.

Para atender ao objetivo de fornecer propostas de redes prioritárias de transporte público por ônibus através da espacialização em SIG dos resultados matemáticos do método de otimização, foram selecionados os indivíduos da fronteira de Pareto destacados na Figura 33, de IDs A, B, C, D e E, cujos atributos são apresentados na Tabela 7. Os pontos A e E foram selecionados por representarem pontos extremos na fronteira. Os pontos C e D representam os pontos limites da lacuna que foi formada na fronteira de Pareto ao longo da evolução das gerações (vide Apêndice E). Já o ponto B, foi selecionado para mostrar uma solução intermediária entre os pontos A e C. Dessa forma, a seleção desses pontos permite a visualização espacial de redes de transporte com diferentes configurações e atributos. Os valores da quilometragem de faixas exclusivas apresentados na Tabela 7 derivam dos valores da função objetivo 2 (F_2), e para o cálculo, foi excluída a ponderação através da pontuação AHP. Esses indivíduos serão melhor discutidos na próxima subseção.

Tabela 7 – Atributos dos indivíduos selecionados para espacialização

	A	B	C	D	E
Valores da função objetivo 1 (F_1) [minutos]	176,90	185,14	194,45	205,14	209,68
Redução de tempo (comparado à alternativa de não implantação de faixas exclusivas)	23,6%	20,0%	16,0%	11,4%	9,4%
Valores da função objetivo 2 (F_2)	90,83	74,14	57,82	39,70	32,44
Quilômetros de faixas exclusivas	44,64	37,91	30,31	21,57	17,87
% de implantação de faixas exclusivas em relação ao total de quilômetros da rede AHP	82,6%	70,2%	56,1%	39,9%	33,1%
% de implantação de faixas exclusivas em relação ao total de vias com circulação de ônibus na cidade	11,71%	9,95%	7,95%	5,66%	4,69%
% de implantação de faixas exclusivas em relação ao total de vias da cidade	3,05%	2,59%	2,07%	1,47%	1,22%

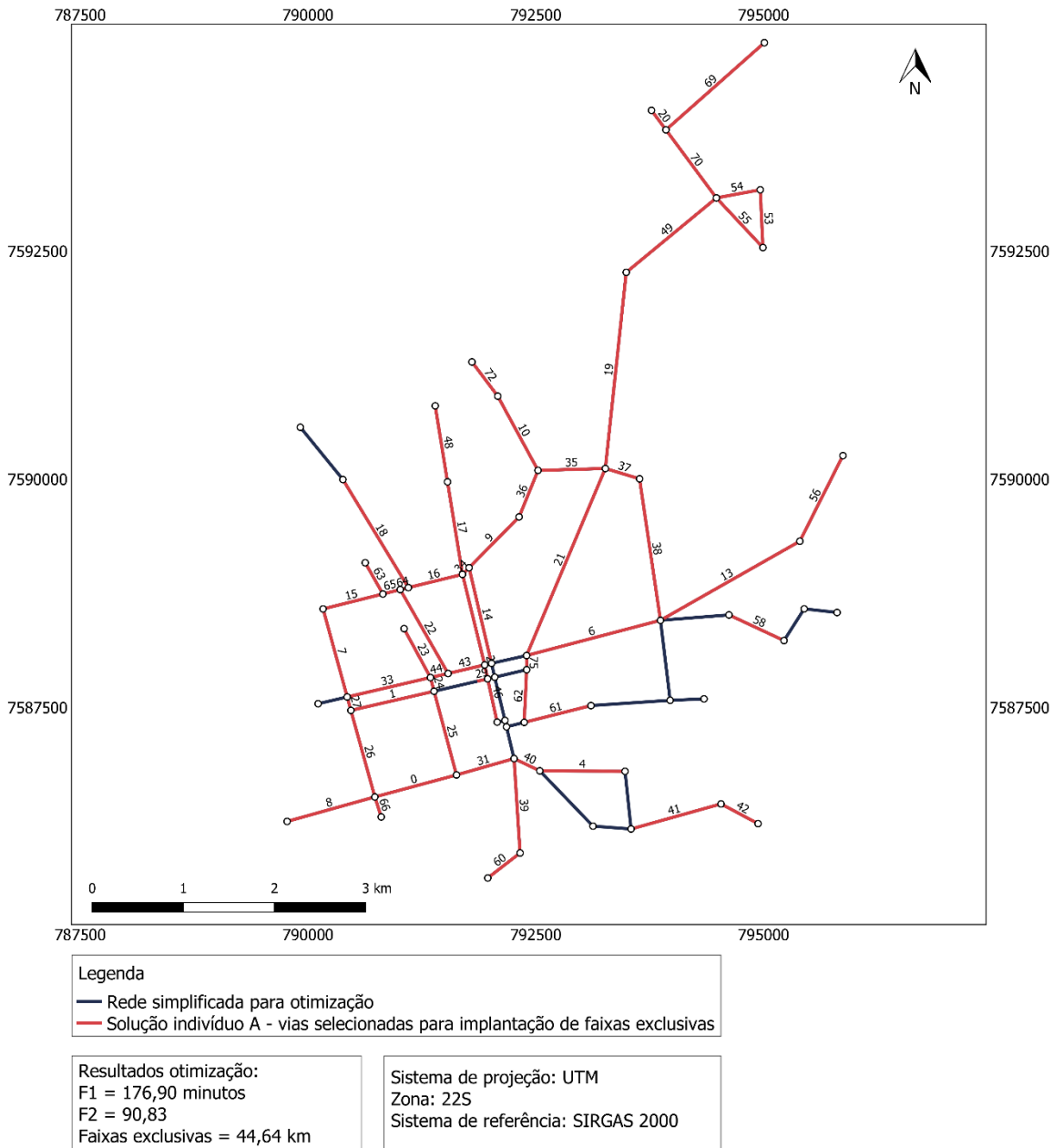
Fonte: elaborado pela autora (2021).

5.4 Geoespacialização dos resultados

Aqui, pretende-se discutir os resultados do ponto de vista físico e analisar a viabilidade de implantação das soluções do algoritmo de otimização. Para tal, foram espacializados os indivíduos de A, B, C, D e E apresentados na subseção 5.3. Ainda, ao final, é apresentada uma análise da porcentagem de vezes que cada um dos *links* foi selecionado nos indivíduos da fronteira de Pareto da geração 2000. Nos mapas a seguir (Figuras 34 a 39), os valores apresentados junto aos *links*, representam o ID de cada *link*.

Para análise das soluções, conforme descrito no item 3.6, foi utilizada a estimativa de população do IBGE para 2019, que é de 236.072 habitantes. Para essa população, o indicador “quilômetros de vias dedicadas exclusivamente ao transporte público por 100.000 habitantes” atinge o valor de 10 e entra na categoria “amarelo” se forem implantados 23,61 quilômetros de faixas exclusivas e o valor 40 – categoria “verde” – com a implantação de 94,43 quilômetros de faixas exclusivas. Três soluções (A, B e C) apresentam valores acima de 10 nesse indicador, entretanto, nenhuma solução se encaixa na categoria “verde”, justamente pelo rigor dos valores propostos pelo BID (2013). A extensão total de vias de Araraquara - SP é de 1.464,24 quilômetros e as vias onde há circulação de ônibus somam 381,08 quilômetros, ou seja, a exigência do BID para que Araraquara – SP seja considerada sustentável é de prioridade em cerca de 25% das vias onde há circulação de ônibus. Dadas as condições orçamentárias brasileiras, essa exigência é impraticável e, portanto, soluções acima de 10 km / 100.000 habitantes são consideradas satisfatórias neste trabalho. Nessa análise também serão utilizados os valores apresentados pelo IDEC - Instituto Brasileiro De Defesa Do Consumidor (2020), para as cidades de Curitiba (9,27 km / 100.000 habitantes), Porto Alegre (8,63 km / 100.000 habitantes) e São Paulo (6,49 km / 100.000 habitantes), que possuem os maiores valores para o indicador nas doze cidades estudadas pelo instituto.

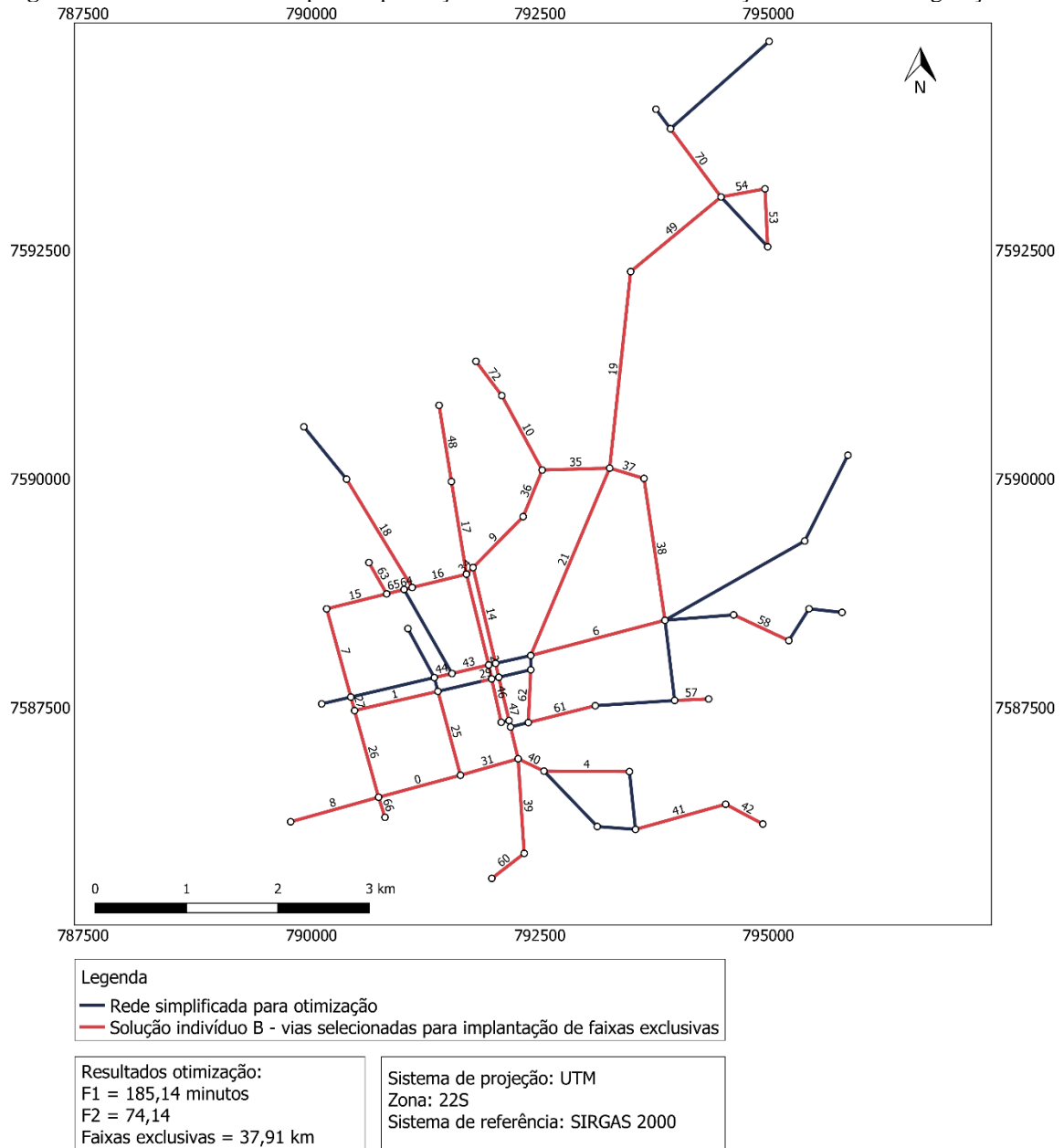
O indivíduo A, apresentado na Figura 34, é o que possui o menor tempo total na rede e a maior quilometragem de faixas implantadas dos cinco indivíduos especializados. Possui um tempo total na rede de 176,90 minutos e 44,64 km de faixas exclusivas implantadas, cerca de 11,71% da quilometragem de vias onde há circulação de ônibus na cidade, ou seja, nessa configuração, cerca de 11,7% da rede de transporte público seria prioritária. Em relação ao total de vias da cidade, representa cerca de 3,05%. Cabe apontar que, mesmo esta solução, que é a mais custosa em termos de implantação, ainda representa um percentual pequeno em relação ao total de vias da cidade e mesmo das vias onde há circulação de ônibus. Por outro lado, representa uma redução de cerca de 23,61% no tempo total de viagem na rede. A classificação de acordo com o BID seria “amarela”, com o maior valor de indicador, que é de 18,91km/100.000 hab., maior que os valores apresentados por Curitiba, Porto Alegre e São Paulo.

Figura 34 - Vias selecionadas para implantação de faixas exclusivas – solução indivíduo A da geração 2000

Fonte: elaborado pela autora (2021).

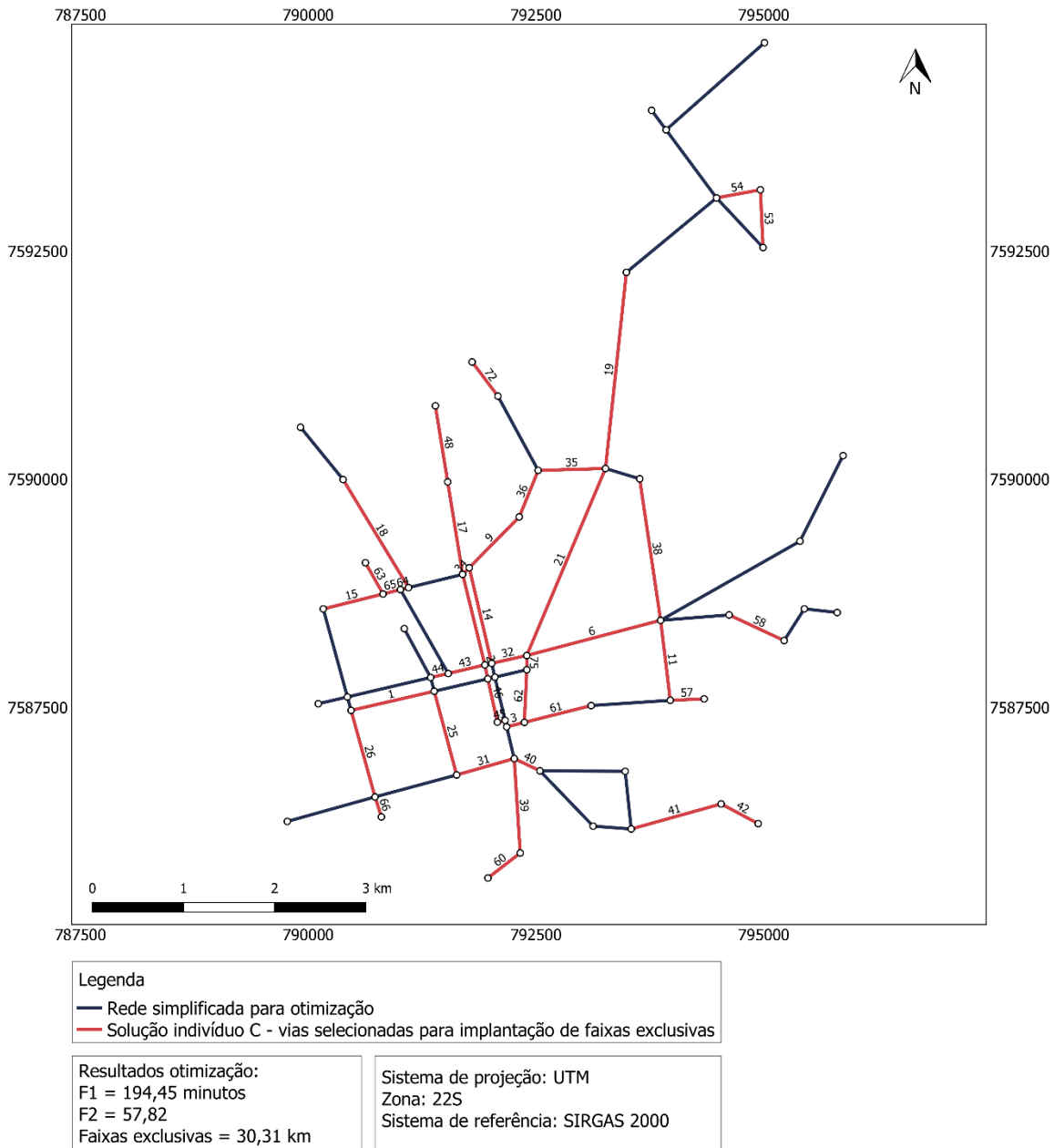
O indivíduo B, apresentado na Figura 35, possui um tempo total na rede de 185,14 minutos e 37,91 km de faixas exclusivas implantadas, cerca de 9,95% da quilometragem de vias onde há circulação de ônibus e 2,59% das vias da cidade. Em relação aos cinco indivíduos espacializados, possui o segundo menor tempo total na rede e a segunda maior quilometragem de faixas implantadas. A classificação de acordo com o BID seria “amarela”, pois o valor do indicador é de 16,06 km/100.000 hab., acima dos valores das cidades de referência Curitiba (9,27), Porto Alegre (8,63) e São Paulo (6,49).

Figura 35 - Vias selecionadas para implantação de faixas exclusivas – solução indivíduo B da geração 2000



Fonte: elaborado pela autora (2021).

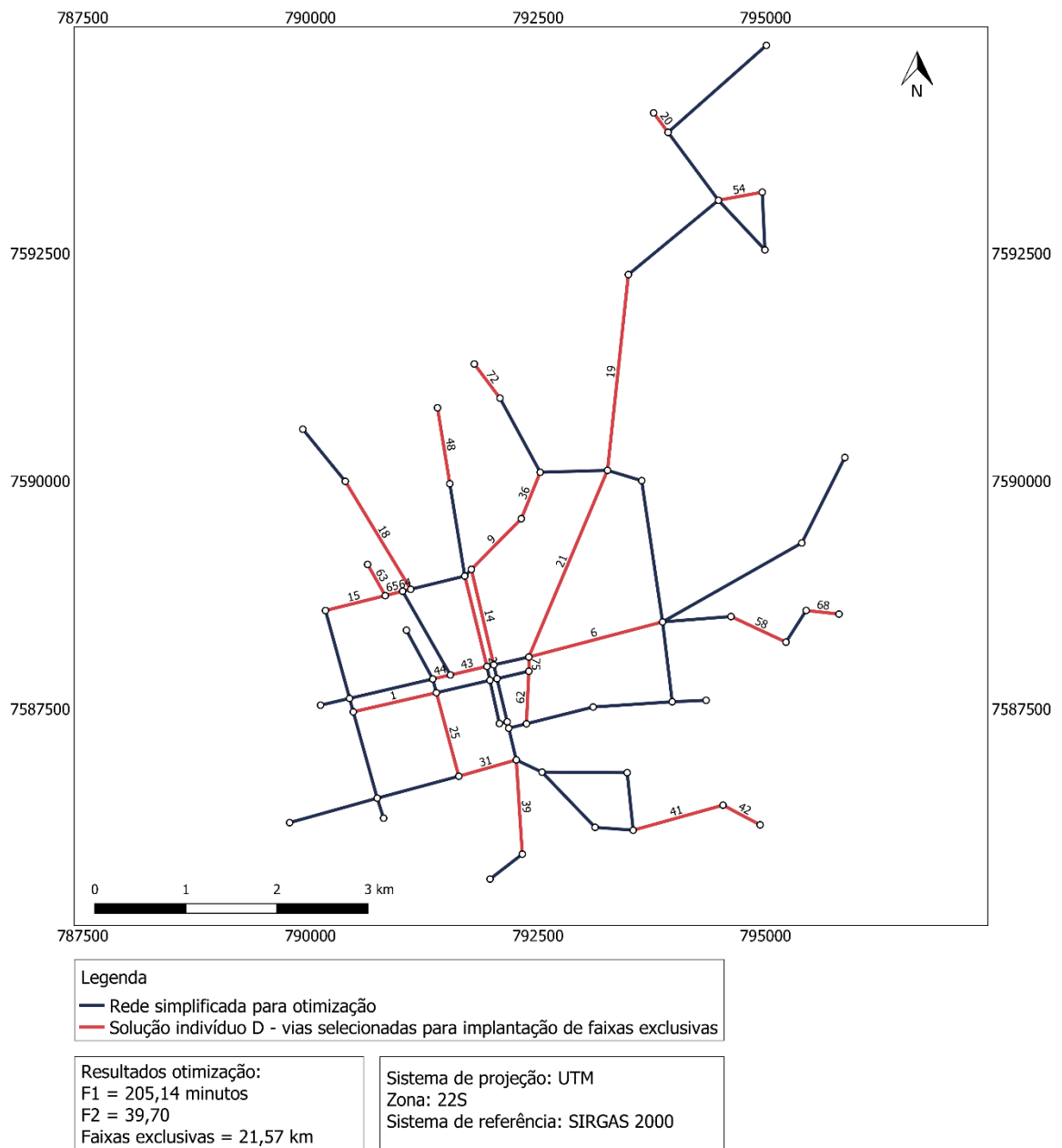
O indivíduo C, apresentado na Figura 36, possui um tempo total na rede de 194,45 minutos e 30,31km de faixas exclusivas implantadas, cerca de 7,95% da quilometragem de vias onde há circulação de ônibus e 2,07% das vias da cidade. Em relação aos cinco indivíduos espacializados, fica em na posição intermediária em termos de tempo total na rede e quilometragem de faixas implantadas. A classificação de acordo com o BID seria “amarela”, com um valor de indicador de 12,84 km/100.000 hab., maior que os valores apresentados por Curitiba, Porto Alegre e São Paulo.

Figura 36 - Vias selecionadas para implantação de faixas exclusivas – solução indivíduo C da geração 2000

Fonte: elaborado pela autora (2021).

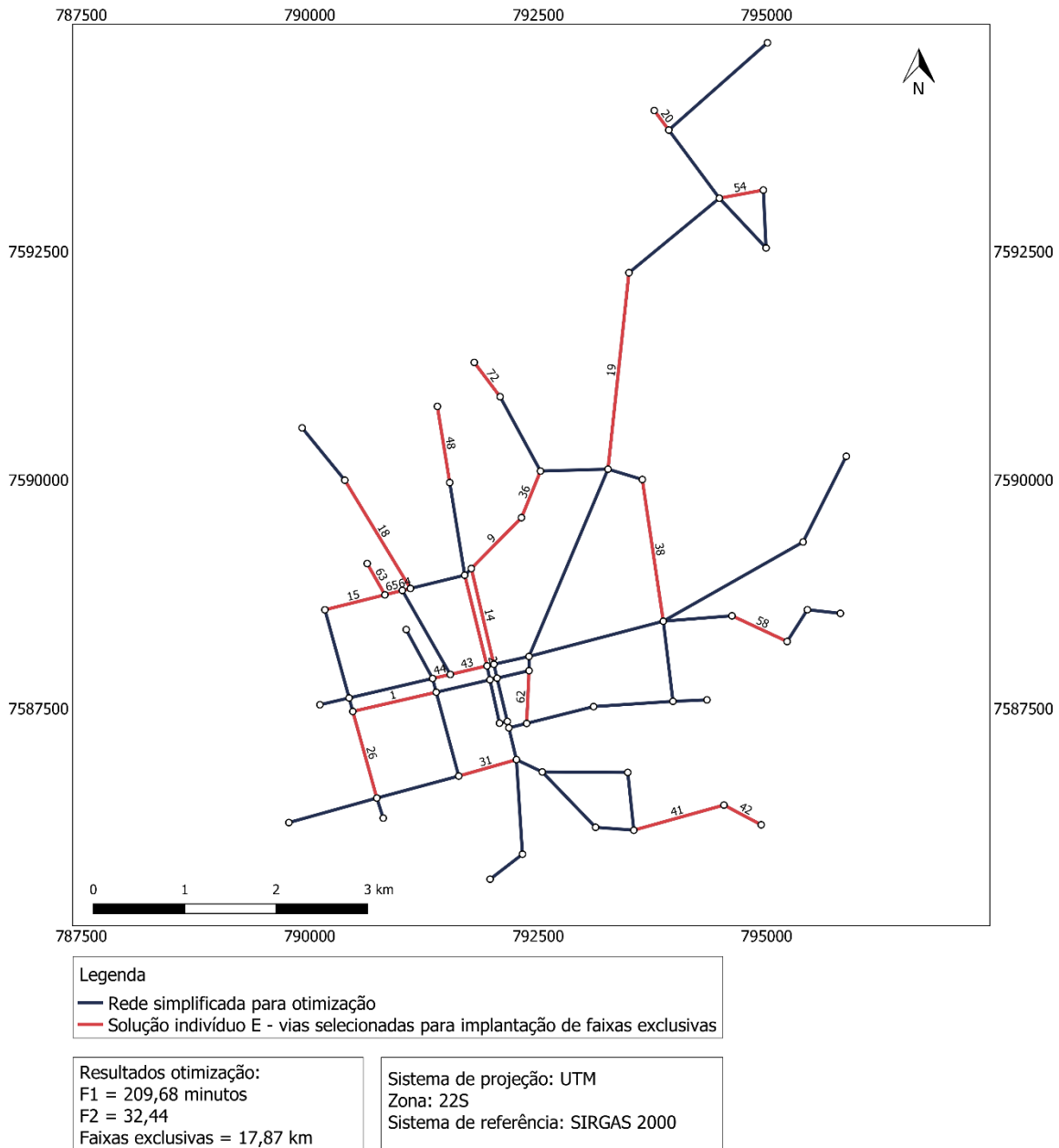
O indivíduo D, apresentado na Figura 37, possui um tempo total na rede de 205,14 minutos e 21,57 km de faixas exclusivas implantadas, cerca de 5,66% da quilometragem de vias onde há circulação de ônibus e 1,47% das vias da cidade. Em relação aos cinco indivíduos espacializados, possui o quarto maior tempo total na rede e a segunda menor quilometragem de faixas implantadas. A classificação de acordo com o BID seria “vermelha”, pois o valor do indicador é de 9,14 km/100.000 hab., mas ainda assim a solução apresenta um valor próximo ao valor de Curitiba (9,27) e maior que os valores apresentados por Porto Alegre (8,63) e São Paulo (6,49).

Figura 37 - Vias selecionadas para implantação de faixas exclusivas – solução indivíduo D da geração 2000



Fonte: elaborado pela autora (2021).

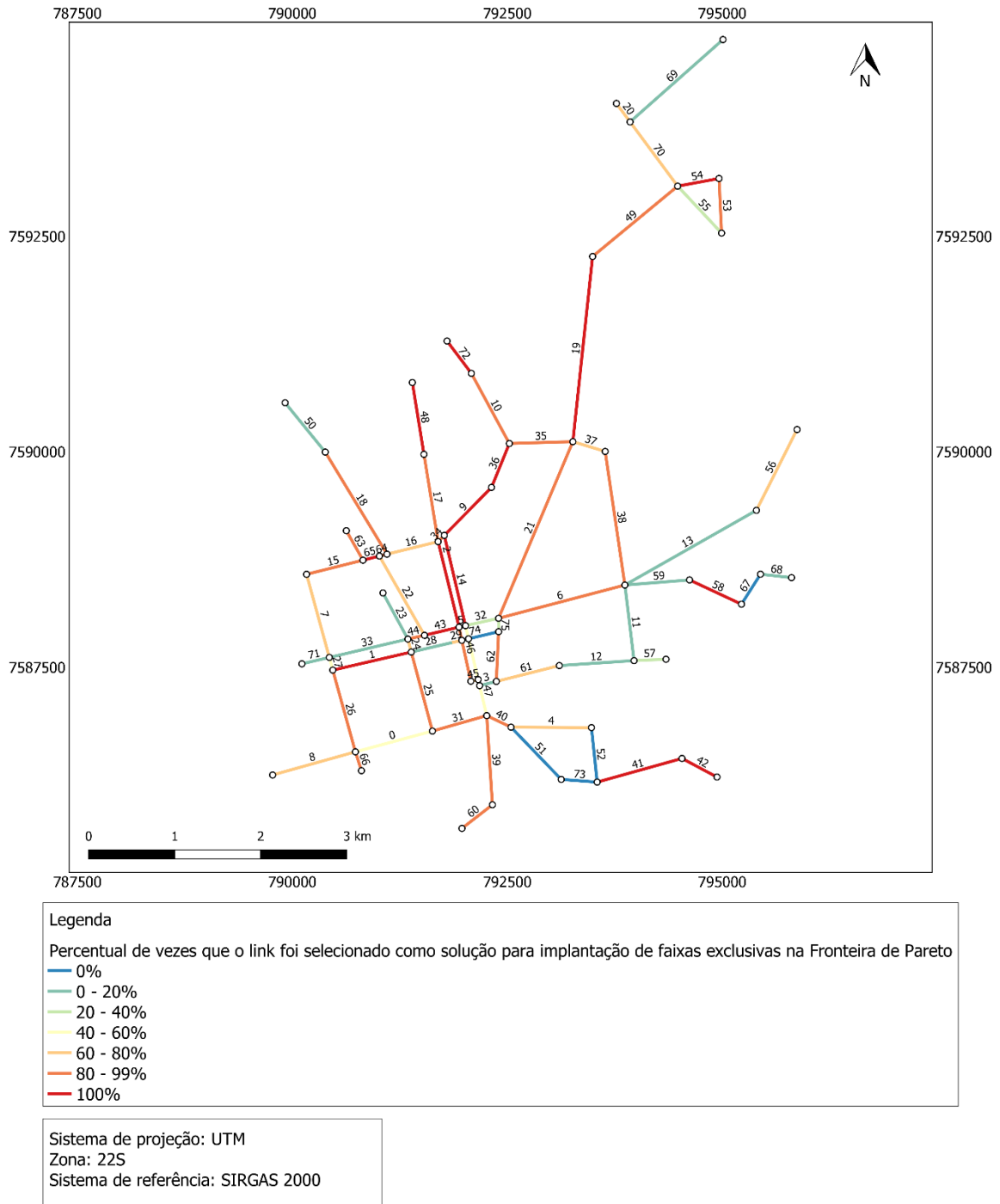
O indivíduo E, apresentado na Figura 38, possui um tempo total na rede de 209,68 minutos e 17,87km de faixas exclusivas implantadas, cerca de 4,69% da quilometragem de vias onde há circulação de ônibus e 1,22% das vias da cidade. Possui o maior tempo total na rede e a menor quilometragem de faixas implantadas em relação aos cinco indivíduos especializados. A classificação de acordo com o BID seria “vermelha”, pois o valor do indicador é de 7,57 km/100.000 hab., maior apenas que o valor apresentado por São Paulo (6,49).

Figura 38 - Vias selecionadas para implantação de faixas exclusivas – solução indivíduo E da geração 2000

Fonte: elaborado pela autora (2021).

Por fim, na Figura 39 e na Tabela 8, é apresentada uma análise da porcentagem de vezes que cada um dos *links*/logradouros foi selecionado nos indivíduos da fronteira de Pareto da geração 2000. O percentual de 100% representa que o *link* foi selecionado como solução para implantação de faixas exclusivas em todos os indivíduos da fronteira de Pareto, ao passo que 0% representa que o *link* não foi selecionado em nenhum indivíduo.

Figura 39 – Mapa de percentual de seleção do *link*/logradouro nos indivíduos da fronteira de Pareto da geração 2000



Fonte: elaborado pela autora (2021).

Tabela 8 – ID, logradouro e percentual de seleção do *link*/logradouro nos indivíduos da fronteira de Pareto da geração 2000

ID	Logradouro	Percentual de seleção do <i>link</i> /logradouro nos indivíduos da fronteira de Pareto da geração 2000 ¹
0	Sete de Setembro	47,70%
1	José Bonifácio	100,00%
2	São Bento	100,00%
3	Santo Antonio	6,40%
4	Padre Manoel Nobrega	78,50%
5	Barroso	0,60%
6	Padre Antonio Cezarino	97,70%
7	Castro Alves	64,00%
8	Presidente Vargas	72,10%
9	Bento de Abreu	100,00%
10	Napoleao Selmi Dei	95,30%
11	Paulista	4,10%
12	Joao Batista de Oliveira	19,20%
13	Francisco Vaz Filho	15,10%
14	9 de Julho	100,00%
15	Padre Francisco Colturato	99,40%
16	Padre Francisco Colturato	63,40%
17	9 de Julho	95,90%
18	Armando De Salles Oliveira	98,80%
19	Mauricio Galli	100,00%
20	Picasso	70,30%
21	Maria Antonia Camargo de Oliveira	97,70%
22	Carlos Gomes	70,30%
23	Expedicionários do Brasil	19,80%
24	Expedicionários do Brasil	69,80%
25	Expedicionários do Brasil	97,70%
26	Castro Alves	98,30%
27	Castro Alves	54,10%
28	Jose Bonifácio	2,30%
29	Jose Bonifácio	75,00%
30	Jose Bonifácio	14,50%
31	Sete de Setembro	99,40%
32	Barroso	23,80%
33	Barroso	17,40%
34	Bento de Abreu	95,90%
35	Luiz Alberto	95,90%
36	Napoleao Selmi Dei	100,00%
37	Paulista	70,90%
38	Paulista	98,30%
39	Maria Antonia Camargo de Oliveira	98,80%
40	Padre José De Anchieta	95,90%
41	Alberto Santos Dumont	100,00%
42	Alberto Santos Dumont	100,00%
43	Barroso	100,00%
44	Barroso	98,80%
45	Portugal	75,00%
46	Sao Bento	92,40%
47	9 de Julho	50,60%

ID	Logradouro	Percentual de seleção do <i>link</i> /logradouro nos indivíduos da fronteira de Pareto da geração 2000 ¹
48	9 de Julho	100,00%
49	Mauricio Galli	89,50%
50	Armando de Salles Oliveira	16,30%
51	Padre Jose de Anchieta	0,00%
52	Matheus de Nobile	0,00%
53	Dr. Edson Baccarin	93,00%
54	Mauricio Galli	100,00%
55	Pablo Picasso	22,10%
56	Francisco Vaz Filho	62,80%
57	João Batista de Oliveira	27,30%
58	Joaquim Vieira dos Santos	100,00%
59	Joaquim Vieira dos Santos	1,70%
60	Maria Antonia Camargo de Oliveira	95,30%
61	Santo Antonio	70,30%
62	Maria Antonia Camargo de Oliveira	99,40%
63	Expedicionários do Brasil	99,40%
64	Padre Francisco Colturato	98,80%
65	Padre Francisco Colturato	100,00%
66	Castro Alves	81,40%
67	São José do Rio Preto	0,00%
68	America	19,20%
69	Dr. José Logatti	9,90%
70	Picasso	72,10%
71	Barroso	1,70%
72	Napoleao Selmi Dei	100,00%
73	Alberto Santos Dumont	0,00%
74	Jose Bonifácio	0,00%
75	Maria Antonia Camargo de Oliveira	23,30%

¹Percentual de vezes que o logradouro foi selecionado como solução para implantação de faixas exclusivas, onde 100% equivale à seleção em todos os indivíduos da fronteira de Pareto.

Fonte: elaborado pela autora (2021).

6. CONCLUSÕES

6.1 Considerações finais

Este trabalho buscou desenvolver um modelo de tomada de decisão para o problema de projeto de rede de transporte público por ônibus (TNDP), mais precisamente a determinação de vias prioritárias para implantação de corredores ou faixas exclusivas de ônibus, em Araraquara, São Paulo, uma cidade brasileira de porte médio.

Após uma introdução e contextualização do tema, foi apresentado um referencial teórico contendo uma análise bibliométrica, na qual foi possível observar o crescimento de pesquisas relacionadas a prioridade de sistemas de transporte público por ônibus, principalmente após 2012. Além disso, foi possível observar que um dos métodos propostos para esta pesquisa (algoritmo genético) aparece como palavra-chave em trabalhos da área e em pesquisas bastante recentes – a partir de 2016 – mostrando a atualidade do tema e das propostas de solução aqui adotados. Ainda, no capítulo de referencial teórico o problema foi conceituado de acordo com a literatura e foram analisados trabalhos que utilizaram os métodos deste trabalho.

Quanto ao método de trabalho, foram combinados uma análise multicritério e um método de otimização, com solução através do algoritmo genético NSGA-II. A análise multicritério foi realizada através do método AHP - *Analytic Hierarchy Process* (Processo Analítico Hierárquico) e serviu para o propósito principal de simplificar a rede da cidade de Araraquara – SP, para que fosse possível realizar o processamento computacional do algoritmo genético. A justificativa para escolha desse método foi a possibilidade de inserir características socioeconômicas na tomada de decisão através do processo de otimização, dada a indisponibilidade de dados de origem e destino de viagens. Ainda, aponta-se que os dados utilizados no método AHP são de fácil disponibilidade em bases nacionais e municipais, o que possibilita a replicabilidade deste estudo em outros municípios brasileiros.

Em seguida, foi aplicado um método de otimização na rede simplificada do município. O modelo matemático desse método era composto por uma variável de decisão binária, onde a variável assume valor 1 se uma faixa exclusiva é implantada na via, e valor 0 caso contrário. As funções objetivo buscavam minimizar o somatório do tempo de viagem (dentro do veículo) para toda a rede e a extensão de faixas exclusivas de ônibus construídas, sendo que a extensão teve como ponderador a pontuação obtida no método AHP para cada *link*. Evidencia-se o caráter conflitante das funções, característica de problemas de otimização multiobjetivos, uma vez que para reduzir o tempo total de viagem é necessário aumentar a extensão de faixas exclusivas e para reduzir a extensão é necessário aumentar o tempo total de viagem na rede. O

método de solução adotado para a otimização foi o algoritmo genético NSGA-II, que é considerado um dos algoritmos mais eficazes para resolução de problemas multiobjetivos.

Cinco soluções selecionadas dos resultados matemáticos obtidos foram especializadas através de ferramentas de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e analisadas de acordo com o indicador “quilômetros de vias dedicadas exclusivamente ao transporte público por 100.000 habitantes”.

As vias selecionadas através do método AHP correspondem a eixos tradicionais de transporte na cidade e formam uma rede conectada, característica desejada em redes de transporte, com exceção de alguns trechos pequenos em regiões periféricas. É possível ressaltar também que as vias selecionadas nesta etapa se localizam em zonas populosas ou onde se concentram as maiores densidades da cidade, mas não necessariamente correspondem somente a vias arteriais da cidade. Tais resultados corroboram parcialmente a hipótese adotada de que as faixas exclusivas deverão ser implantadas próximas a áreas urbanas consolidadas e com alta densidade populacional da cidade, assim como geralmente acontece em centros urbanos de grande porte. Ainda, outra especificidade da rede pré-selecionada no método AHP é que ela coincide, em sua maioria, com a rede de tróleibus, que operaram na cidade até o fim da década de 1990. Pode-se concluir a partir disso, que de fato a cidade se desenvolveu em torno desse sistema de transporte, uma vez que 20 anos depois de sua desinstalação, as vias por onde o tróleibus passava ainda aparecem como prioritárias para implantação de faixas exclusivas de ônibus.

As soluções matemáticas do método de otimização, quando especializadas em SIG, mostram redes prioritárias plausíveis de serem implementadas e que representam redução no tempo total de viagem na rede de 9,45 a 23,6%. Os comprimentos totais de cada solução variam de 17,87 a 44,64 quilômetros. Os resultados desta etapa corroboram a hipótese de que haveria redução significativa dos tempos de viagem no processo de otimização de modo a viabilizar e justificar a implantação de faixas exclusivas de ônibus na cidade de Araraquara – SP. Apesar da simplificação matemática realizada, considerando-se uma circulação única na rede, as reduções nos tempos de viagem são de, no mínimo, 9,45% ou 21,88 minutos na menor rede resultante da otimização (Ponto E da Figura 32). A redução pode chegar a 23,61% ou 54,66 minutos, se considerada a rede mais extensa, composta por 44,64 quilômetros de faixas exclusivas (Ponto A da Figura 32). Cabe apontar que, mesmo a solução mais custosa em termos de implantação (com 44,64 km), ainda representa um percentual pequeno em relação ao total de vias da cidade (3,05%) e mesmo das vias onde há circulação de ônibus (11,71%). Por outro lado, representa uma redução de cerca de 23,61% no tempo total de viagem na rede.

A combinação de ambos os métodos para o processo de tomada de decisão configura-se como uma das principais contribuições realizadas por este trabalho, justamente pela possibilidade de replicá-lo em outras cidades onde dados de pesquisas origem-destino não estão disponíveis, sem deixar de incluir aspectos socioeconômicos na análise. Ainda, este trabalho apresentou uma das primeiras aplicações de um método de otimização com solução através de algoritmo genético em uma rede real de uma cidade brasileira. Por fim, destaca-se como contribuição a análise espacial dos resultados matemáticos, que possibilita a demonstração das alternativas no contexto urbano.

6.2 Trabalhos futuros

Devido à complexidade do problema de projeto de rede de transporte público (TNDP), as possibilidades de expansão deste trabalho são diversas. Primeiramente, para além do projeto de rede, podem ser analisados outros subproblemas apontados por Guihaire e Hao (2008), derivados da divisão do planejamento de sistemas de transporte público propostas por Ceder e Wilson (1986). Podem ser adicionados ao problema aqui tratado projetos de alteração de linhas, a determinação de frequência, a tabela horária, a alocação da frota e da mão de obra.

Em relação aos métodos, podem ser considerados outros critérios na aplicação do método AHP ou então outros modelos matemáticos no processo de otimização, com outras funções objetivos, com dados de entrada de pesquisas de origem-destino quando disponíveis e com tratamento de restrições pertinentes ao problema. Ainda, podem ser comparados resultados com diferentes métodos de solução, além do NSGA-II. Há a possibilidade de desenvolvimento de algoritmos evolutivos novos e testes para analisar o desempenho computacional de diferentes algoritmos.

Em relação ao escopo do estudo, é possível replicá-lo em outras cidades de portes diferentes, apontar o que podem ser especificidades de Araraquara – SP ou então o que se configura um padrão em cidades médias, analisar diferenças observadas em grandes centros urbanos ou em outras regiões brasileiras.

É possível também utilizar o método de tomada de decisão proposto neste trabalho para estudo de outros aspectos de uma rede de transportes, como localização ótima de estações de transporte público, seleção de rotas para implantação de frota com veículos elétricos, conexão com modos de transporte ativos, acessibilidade proporcionada pela implantação de faixas exclusivas de ônibus, análise com outros modos de transporte, e, por fim, estudos de viabilidade econômica e ambiental das soluções aqui apresentadas.

REFERÊNCIAS

- AFOLAYAN, A. H.; OJOKOH, B. A.; ADETUNMBI, A. O. Performance analysis of fuzzy analytic hierarchy process multi-criteria decision support models for contractor selection. **Scientific African**, v. 9, p. e00471, 2020.
- ANTP – Associação Nacional de Transporte Público. Construindo hoje o amanhã: propostas para o transporte público e a mobilidade urbana sustentável no Brasil. **ANTP, Série Cadernos Técnicos**, 25. 72p. Brasília: ANTP, 2019.
- ANTP – Associação Nacional de Transporte Público. Relatório geral 2014 - Sistema de Informações da Mobilidade Urbana da Associação Nacional de Transportes Público. **ANTP**, 2018a. 110p. Disponível em: < <http://www.antp.org.br/relatorios-a-partir-de-2014-nova-metodologia.html>>. Acesso em: 02 mai. 2019.
- ANTP – Associação Nacional de Transporte Público. Relatório geral 2015 - Sistema de Informações da Mobilidade Urbana da Associação Nacional de Transportes Público. **ANTP**, 2018b. 110p. Disponível em: < <http://www.antp.org.br/relatorios-a-partir-de-2014-nova-metodologia.html>>. Acesso em: 02 mai. 2019.
- ANTP – Associação Nacional de Transporte Público. Relatório geral 2016 - Sistema de Informações da Mobilidade Urbana da Associação Nacional de Transportes Público. **ANTP**, 2018c. 110p. Disponível em: <http://www.antp.org.br/relatorios-a-partir-de-2014-nova-metodologia.html>. Acesso em: 02 mai. 2019.
- ANTP – Associação Nacional de Transporte Público. Relatório geral 2017 - Sistema de Informações da Mobilidade Urbana da Associação Nacional de Transportes Público. **ANTP**, 2020. 125p. Disponível em: <http://www.antp.org.br/relatorios-a-partir-de-2014-nova-metodologia.html>. Acesso em: 08 jun. 2020.
- ARARAQUARA. PREFEITURA MUNICIPAL. **Lei complementar n° 850 de 2014 e pela Lei Complementar n° 858 de 2014 – Plano Diretor**. 2014a. Disponível em: <http://www.araraquara.sp.gov.br/governo/secretarias/desenvolvimento-urbano/paginas-desenvolvimento-urbano/conselho-municipal-desenvolvimento-urbano>. Acesso em: 01 abr. 2019.
- ARARAQUARA. PREFEITURA MUNICIPAL - DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ÁGUA E ESGOTOS DE ARARAQUARA. **Plano Municipal de Saneamento Básico**. 2014b. Disponível em: <https://www.daaearaquara.com.br/institucional/plano-municipal-de-saneamento-basico.html>. Acesso em: 03 mai. 2019.
- ARARAQUARA. PREFEITURA MUNICIPAL. Lei Ordinária n° 8.680 de 23 de março de 2016. **Criação da CTA – Controladoria do Transporte de Araraquara**. Disponível em <http://www.ctaonline.com.br/images/pdf/PortalTransparencia/Leis_Cria%C3%A7%C3%A3o_CTA/Lei%20Ordinaria%208680_CTA.pdf>
- ARBEX, R. O.; BARBIERI, C. Efficient transit network design and frequencies setting multi-objective optimization by alternating objective genetic algorithm. **Transportation Research Part B**, v. 81, p. 355–376, 2015.
- BAAJ, M. H.; MAHMASSANI, H. S. An AI-based approach for transit route system planning and design. **Journal of advanced transportation**, v. 25, n. 2, p. 187-209, 1991.
- BAAJ, M. H.; MAHMASSANI, H. S. Hybrid route generation heuristic algorithm for the design of transit networks. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 3, n. 1, p. 31-50, 1995.
- BANAI, R. Public transportation decision-making: A case analysis of the Memphis light rail corridor and route selection with analytic hierarchy process. **Journal of Public Transportation**, v. 9, n. 2, p. 1, 2006.
- BANAI, R. Transit station area land use/site assessment with multiple criteria: An integrated GIS-expert system prototype. **Journal of Public Transportation**, v. 3, n. 1, p. 5, 2000.
- BASSO, L. J; GUEVARA, C. A.; GSCHWENDER, A.; FUSTER, M. Congestion pricing, transit subsidies and dedicated bus lanes: Efficient and practical solutions to congestion. **Transport Policy**, v. 18, n. 5, p. 676-684, 2011.

BENEVENUTO, R.; CAULFIELD, B. Examining transport needs in the global south using a screening framework. **Journal of Transport Geography**, v. 88, p. 102845, 2020.

BID - Banco Interamericano de Desenvolvimento. Anexo 2: indicadores da Iniciativa Cidades Emergentes e Sustentáveis. Guia metodológico 2ª Edição. Banco Interamericano de Desenvolvimento, 2014.

BIELLI, M.; CARAMIA, M.; CAROTENUTO, P. Genetic algorithms in bus network optimization. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 10, n. 1, p. 19-34, 2002.

BONDY, J. A.; MURTY, U. S. R. **Graph theory with applications**. London: Macmillan, 1976.

BORCHERS, T.; RIBEIRO, R. A. Priorização de transporte público por ônibus em cidades médias: revisão, discussão e ferramentas para planejamento. In: ANPET – CONGRESSO EM PESQUISA E ENSINO DE TRANSPORTES, 33, Balneário Camboriú/SC. **Anais [...]**. Balneário Camboriú: 2019.

BOTTERO, M.; LAMI, I. M. Analytic network process and sustainable mobility: an application for the assessment of different scenarios. **Journal of Urbanism**, v. 3, n. 3, p. 275-293, 2010.

BRASIL. Constituição Federal. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. 2020. Disponível em < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm >. Acesso em 10 jan. 2020.

BRASIL. IBGE. Cadastro Central de Empresas 2017. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)**, Rio de Janeiro: 2019.

BRASIL. IBGE. Censo Demográfico - Indicadores Sociais Municipais. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)**, 2010a. Disponível em: < https://ww2.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/indicadores_sociais_municipais/default_indicadores_sociais_municipais.shtm >. Acesso em: 30 abr. 2019.

BRASIL. IBGE. Censo Demográfico. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)**, 2010b. Disponível em: < <https://ww2.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/default.shtm> >. Acesso em: 15 abr. 2019.

BRASIL. IBGE. Censo Demográfico - Tabela 1290. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)**, 2010c. Disponível em: < <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1290> >. Acesso em: 26 abr. 2019.

BRASIL. IBGE. Panorama sobre o município de Araraquara. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)**, 2020. Disponível em: < <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/araraquara/panorama> >. Acesso em: 26 abr. 2020.

BRASIL. IPEA. No 68 Análise preliminar dos dados do Censo 2010. **Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada**, Brasília, 2010.

BRASIL. **Lei nº 10.257 de 10 de Julho de 2001 – Estatuto da Cidade**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/110257.htm. Acesso em: 20 jun. 2020.

BRASIL. **Lei nº 12.587, de 3 de janeiro de 2012. Institui as diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana**. Disponível em < <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2012/lei-12587-3-janeiro-2012-612248-normaatuizada-pl.html> >. Acesso em 01 jul. 2019.

BRASIL. Ministério das Cidades. Manual de BRT- Bus Rapid Transit. **Ministério das Cidades**, Brasília, DF, 2008.

CAT – Consórcio Araraquara de Transportes. **Linhas e horários**. Disponível em: < <http://novocardararaquara.com.br/linhas-e-horarios/> >. Acesso em: 27 jan. 2020.

CEDER, A.; WILSON, N. HM. Bus network design. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 20, n. 4, p. 331-344, 1986.

CERVERO, R. **The transit metropolis: a global inquiry**. Island press, 1998.

CERVERO, R.; DAI, D. BRT TOD: Leveraging transit-oriented development with bus rapid transit investments. **Transport Policy**, v. 36, p. 127-138, 2014.

- CHAKROBORTY, P. Genetic algorithms for optimal urban transit network design. **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, v. 18, n. 3, p. 184-200, 2003.
- CHEN, Q. An optimization model for the selection of bus-only lanes in a city. **PLoS one**, v. 10, n. 7, p. e0133951, 2015.
- CHEN, X.; YU, L.; ZHANG, Y.; GUO, J. Analyzing urban bus service reliability at the stop, route, and network levels. **Transportation research part A: policy and practice**, v. 43, n. 8, p. 722-734, 2009.
- COELLO, C. A. C.; LAMONT, G. B.; VAN VELDHUIZEN, D. A. **Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems**. New York: Springer, 2007.
- CTA – Controladoria do Transporte de Araraquara. **Histórico Companhia Tróleibus**. 2019a. Disponível em <http://www.ctaonline.com.br/index.php/companhia-troleibus.html>. Acesso em: 30 abr. 2019.
- CTA – Controladoria do Transporte de Araraquara. **Total de Passageiros Transportados 2005 a 2015**. 2019b. Disponível em <http://www.ctaonline.com.br/images/pdf/CompanhiaTroleibus/TotalPassageirosCTA.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2019.
- CTA – Controladoria do Transporte de Araraquara. **Total de Passageiros Transportados 2017, 2018 e 2019**. 2020. Disponível em <http://www.ctaonline.com.br/index.php/passageiros-cat.html>. Acesso em: 20 jun. 2020.
- CURRIE, G.; WALLIS, I. Effective ways to grow urban bus markets—a synthesis of evidence. **Journal of Transport Geography**, v. 16, n. 6, p. 419-429, 2008.
- DADASHZADEH, N.; ERGUN, M. Spatial bus priority schemes, implementation challenges and needs: an overview and directions for future studies. **Public Transport**, v. 10, n. 3, p. 545-570, 2018.
- DAGANZO, C. F. Structure of competitive transit networks. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 44, n. 4, p. 434-446, 2010.
- DE LACERDA, E. G. M.; DE CARVALHO, A. C. P. L. F. **Introdução aos algoritmos genéticos**. Sistemas inteligentes: aplicações a recursos hídricos e ciências ambientais, v. 1, p. 99-148, 1999.
- DEB, K.; PRATAP, A.; AGARWAL, S.; MEYARIVAN, T. A. M. T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. **IEEE transactions on evolutionary computation**, v. 6, n. 2, p. 182-197, 2002.
- DENATRAN. **Estatísticas - Frota de Veículos, 2020**. Disponível em: <https://infraestrutura.gov.br/component/content/article/115-portal-denatran/8552-estat%C3%ADsticas-frota-de-ve%C3%ADculos-denatran.html> Acesso em: 19 jun. 2020.
- EICHLER, M.; DAGANZO, C. F. Bus lanes with intermittent priority: Strategy formulae and an evaluation. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 40, n. 9, p. 731-744, 2006.
- ELSEVIER. **Scopus**. Editora Elsevier. Disponível em: <https://www.scopus.com/home>. Acesso em: 14 jun. 2019.
- EMBARQ BRASIL (Org.). Manual de desenvolvimento urbano orientado ao transporte sustentável. 2015.
- ESTRADA, M.; ROCA-RIU, M.; BADIA, H.; ROBUSTÉ, F.; DAGANZO, C. F. Design and implementation of efficient transit networks: procedure, case study and validity test. **Procedia-Social and Behavioral Sciences**, v. 17, p. 113-135, 2011.
- FARAHANI, R. Z.; MIANDOABCHI, E.; SZETO, W. Y.; RASHIDI, H. A review of urban transportation network design problems. **European Journal of Operational Research**, v. 229, n. 2, p. 281-302, 2013.
- FELIX, R. R. O. M.; RIONDET-COSTA, D. R. T.; LIMA, J. P. Avaliação de áreas urbanas com vistas ao desenvolvimento orientado ao transporte sustentável. In: ANPET – CONGRESSO EM PESQUISA E ENSINO DE TRANSPORTES, 31, Recife/PE. **Anais [...]**. Recife/PE: 2017.

GOH, K. C. K.; CURRIE, G.; SARVI, M.; LOGAN, D. Bus accident analysis of routes with/without bus priority. **Accident Analysis & Prevention**, v. 65, p. 18-27, 2014.

GOMEZ, A.; PIBOULEAU, L.; AZZARO-PANTEL, C.; DOMENECH, S.; LATGÉ, C.; HAUBENSACK, D. Multiobjective genetic algorithm strategies for electricity production from generation IV nuclear technology. **Energy Conversion and Management**, v. 51, n. 4, p. 859-871, 2010.

GOOGLE. Google Earth. **Imagens aéreas de Araraquara: 2012 - 2020**. Disponível em: <<https://earth.google.com/web/@-21.77719385,-48.16652964,689.69155458a,30186.37783666d,35y,0h,0t,0r>>. Acesso em: 26 mai. 2020.

GOOGLE. Google Maps. Street view. Google, 2020. Disponível em: <<https://www.google.com/maps>>. Acesso em: 26 mai. 2020.

GOULART, J. O.; TERCI, E. T.; OTERO, E. V. A dinâmica urbana de cidades médias do interior paulista sob o Estatuto da Cidade. **Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais (RBEUR)**, v. 15, n. 1, p. 183-200, 2013.

GUIHAIRE, V.; HAO, J. K. Transit network design and scheduling: A global review. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 42, n. 10, p. 1251-1273, 2008.

HARRIS, C. R.; MILLMAN, K. J.; VAN DER WALT, S. J.; GOMMERS, R.; VIRTANEN, P.; COURNAPEAU, D.; OLIPHANT, T. E. Array programming with NumPy. *Nature*, v. 585, n. 7825, p. 357-362, 2020.

HUNTER, J. D. Matplotlib: A 2D graphics environment. **IEEE Annals of the History of Computing**, v. 9, n. 03, p. 90-95, 2007.

IDEC – Instituto Brasileiro De Defesa Do Consumidor. Análise das infraestruturas de priorização do transporte coletivo sobre pneus nas 12 capitais mais populosas do Brasil. **Instituto Brasileiro De Defesa Do Consumidor**, 2020.

JETBRAINS (Org.). IDE Pycharm. Versão: 2021.1.1 Community. Jetbrains, 2021. Disponível em: <https://www.qgis.org/pt_BR/site/forusers/download.html#>. Acesso em: 21 abr. 2021.

KEPAPTSOGLU, K.; KARLAFTIS, M. Transit route network design problem: review. **Journal of transportation engineering**, v. 135, n. 8, p. 491-505, 2009.

KHOO, H. L.; TEOH, L. E.; MENG, Q. A bi-objective optimization approach for exclusive bus lane selection and scheduling design. **Engineering Optimization**, v. 46, n. 7, p. 987-1007, 2014.

LERNER, J. Avaliação comparativa das modalidades de transporte público urbano. **NTU, Associação Nacional das Empresas de transporte Urbano, Jaime Lerner Associados**, 2009.

MANDL, C. E. Evaluation and optimization of urban public transportation networks. **European Journal of Operational Research**, v. 5, n. 6, p. 396-404, 1980.

MAUTTONE, A.; URQUHART, M. E. A route set construction algorithm for the transit network design problem. **Computers & Operations Research**, v. 36, n. 8, p. 2440-2449, 2009.

MCKINNEY, Wes; VAN DER WALT, S.; MILLMAN, J. Proceedings of the 9th Python in Science Conference. **Data structures for statistical computing in Python**, p. 51-56, 2010.

MESBAH, M.; SARVI, M.; CURRIE, G. Optimization of transit priority in the transportation network using a genetic algorithm. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 12, n. 3, p. 908-919, 2011.

NEWMAN, P. WG; KENWORTHY, J. R. The land use - transport connection: An overview. **Land use policy**, v. 13, n. 1, p. 1-22, 1996.

NIELSEN, G.; NELSON, J. D.; MULLEY, C. Public transport: planning the networks. **HiTrans**. 2005.

NTU (Org.). Faixas exclusivas de ônibus urbanos. **Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos – NTU**, Brasília, 2013.

NTU (Org.). Prioridade ao transporte público por ônibus: Panorama dos projetos e investimentos. **Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos – NTU**, Brasília, 2015.

ONU (Org.). Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. **Organização Das Nações Unidas**, traduzido pelo Centro de Informação das Nações Unidas para o Brasil (UNIC Rio), 2015. Disponível em <<https://nacoesunidas.org/wp-content/uploads/2015/10/agenda2030-pt-br.pdf>>. Acesso em 01 jul. 2019.

ONU (Org.). Global Report on Human Settlements 2011 - Cities and Climate Change. **Organização das Nações Unidas, 2011**. United Nations Human Settlements Programme. London - Washington DC: Earthscan, 2011.

OSWALD BEILER, M. R.; TREAT, C. Integrating GIS and AHP to prioritize transportation infrastructure using sustainability metrics. **Journal of infrastructure systems**, v. 21, n. 3, p. 04014053, 2015.

PATNAIK, S. B.; MOHAN, S.; TOM, V. M. Urban bus transit route network design using genetic algorithm. **Journal of transportation engineering**, v. 124, n. 4, p. 368-375, 1998.

PIERINI, C. R. **Análise da compacidade e da dispersão urbana de Araraquara-SP: um instrumento de diagnóstico e cartografia social do vazio urbano**. Tese (Doutorado em Engenharia Urbana) – Departamento de Engenharia Civil, UFSCar, São Carlos, 2020.

QGIS (Org.). **QGIS Geographic Information System**. Versão: 3.4.8. Open-Source Geospatial Foundation Project, 2019. Disponível em: <https://www.qgis.org/pt_BR/site/forusers/download.html#>. Acesso em: 04 set. 2019.

QGIS (Org.). **Complemento VectorBender**. Versão: 0.2.1. Open-Source Geospatial Foundation Project, 2019. Disponível em: <<https://plugins.qgis.org/plugins/VectorBender/>>. Acesso em: 28 mai. 2020.

SAATY, T. L. How to make a decision: the analytic hierarchy process. **European journal of operational research**, v. 48, n. 1, p. 9-26, 1990.

SAATY, T. L.; VARGAS, L. G.; **Models, methods, concepts & applications of the analytic hierarchy process** (Vol. 175). Springer Science & Business Media, 2012.

SALAVATI, A.; HAGHSHEENAS, H.; GHADIRIFARAZ, B.; LAGHAEI, J.; EFTEKHARI, G. Applying AHP and Clustering Approaches for Public Transportation Decision-making: A Case Study of Isfahan City. **Journal of Public Transportation**, v. 19, n. 4, p. 3, 2016.

SOARES, P. B.; CARNEIRO, T. C. J.; CALMON, J. L.; CASTRO, L. O. D. C. D. Análise bibliométrica da produção científica brasileira sobre Tecnologia de Construção e Edificações na base de dados Web of Science. **Ambiente Construído**, v. 16, n. 1, p. 175-185, 2016.

SOLTANI, A.; MARANDI, E. Z.; IVAKI, Y. E. Bus route evaluation using a two-stage hybrid model of Fuzzy AHP and TOPSIS. **Journal of Transport Literature**, v. 7, n. 3, p. 34-58, 2013.

SUZUKI, H.; CERVERO, R.; IUCHI, K. Transforming Cities with Transit and Land-Use Integration for Sustainable Urban Development. **The World Bank**, Washington, DC, 2013.

SZETO, W. Y.; WU, Y. A simultaneous bus route design and frequency setting problem for Tin Shui Wai, Hong Kong. **European Journal of Operational Research**, v. 209, n. 2, p. 141-155, 2011.

TALBI, El-G. **Metaheuristics: from design to implementation**. John Wiley & Sons, 2009.

VAN ROSSUM, G.; DRAKE, FL. Python 3 Reference Manual. Scotts Valley, CA: CreateSpace; 2009.

VIEGAS, J.; LU, B. The intermittent bus lane signals setting within an area. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 12, n. 6, p. 453-469, 2004.

VOSVIEWER. **Vosviewer para Windows, versão 1.6.11**. Desenvolvido por Nees Jan van Eck e Ludo Waltman no Centro de Ciência e Estudos de Tecnologia da Universidade de Leiden, 2019. Disponível em <<https://www.vosviewer.com/>>. Acesso em 15 jun. 2019.

WEY, W-M. Smart growth and transit-oriented development planning in site selection for a new metro transit station in Taipei, Taiwan. **Habitat International**, v. 47, p. 158-168, 2015.

YAĞCITEKİN, B.; UZUNOĞLU, M.; KARAKAŞ, A. A new deployment method for electric vehicle charging infrastructure. **Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences**, v. 24, n. 3, p. 1292-1305, 2016.

YANG, J.; JIANG, Y. Application of Modified NSGA-II to the Transit Network Design Problem. **Journal of Advanced Transportation**, v. 2020, 2020.

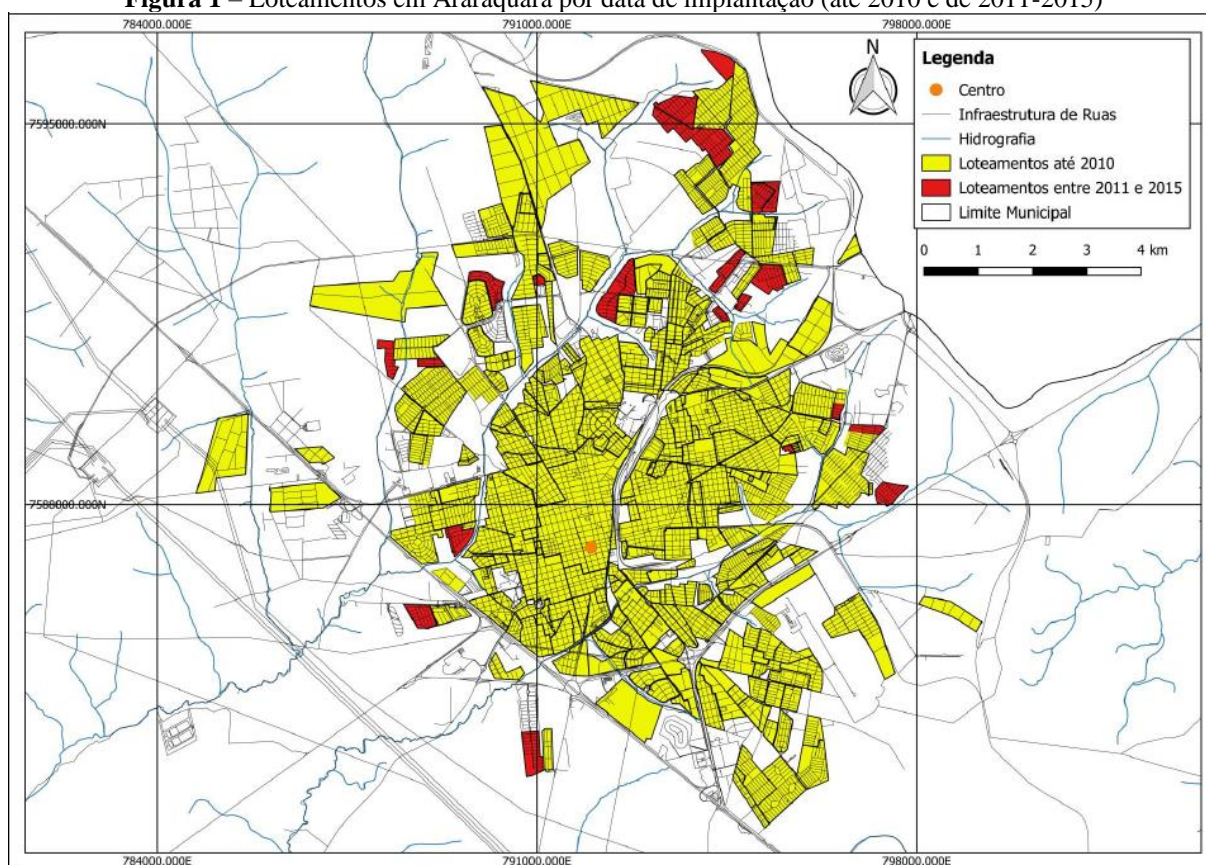
YU, B.; KONG, L.; SUN, Y.; YAO, B.; GAO, Z. A bi-level programming for bus lane network design. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 55, p. 310-327, 2015.

ZHENG, N.; GEROLIMINIS, N. On the distribution of urban road space for multimodal congested networks. **Procedia-Social and Behavioral Sciences**, v. 80, p. 119-138, 2013.

APÊNDICE A – Estimativa populacional em loteamentos e condomínios construídos após 2010 em Araraquara - SP

Em virtude da dinamicidade da ocupação do solo do município de Araraquara, foi necessário estimar a população residente em loteamentos e condomínios construídos após 2010. Na Figura 1, Pierini (2020) apresenta os loteamentos do município de Araraquara - SP até 2015, e baseado na data de criação dos locais foram criados novos setores. Na Figura 2, os setores em vermelho representam esses locais urbanizados desde o último Censo (IBGE, 2010b).

Figura 1 – Loteamentos em Araraquara por data de implantação (até 2010 e de 2011-2015)



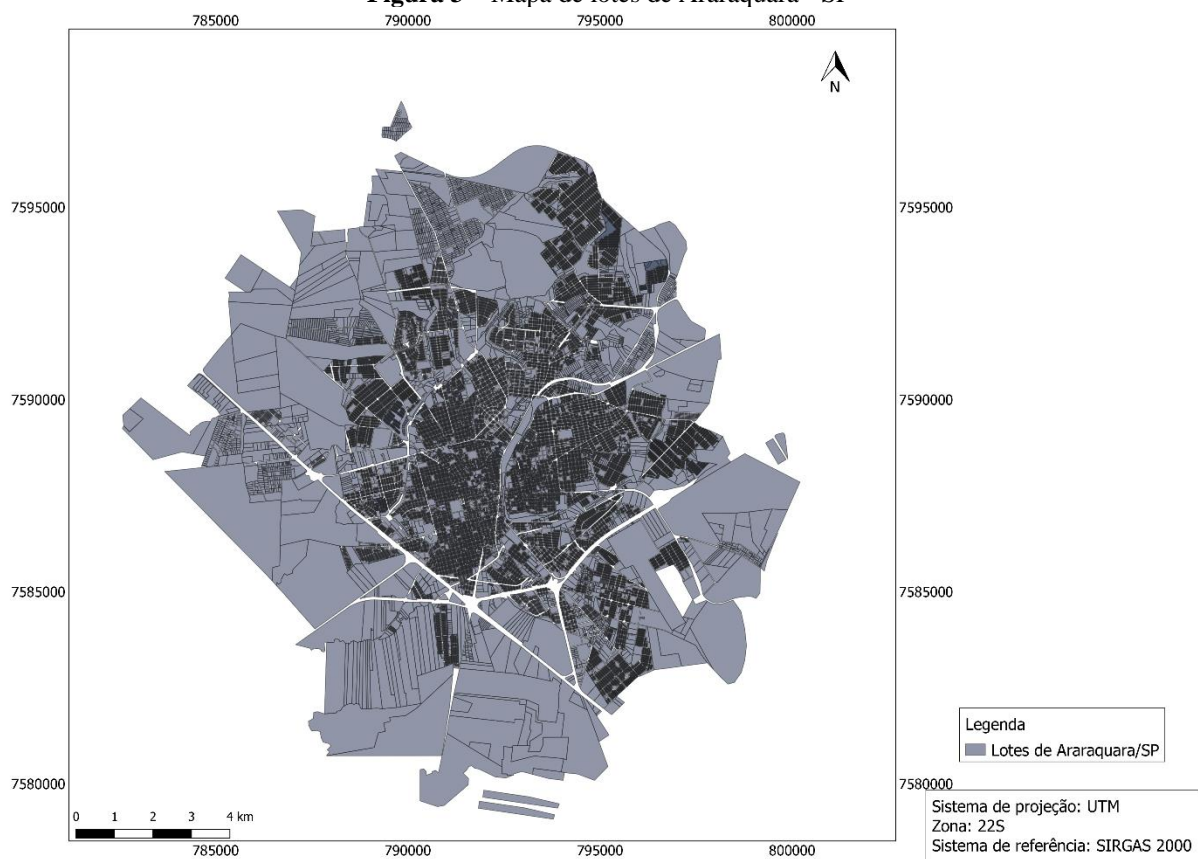
Fonte: Pierini (2020).

Figura 2 – Mapa de setores censitários (IBGE) e loteamentos construídos após 2010

Fonte: elaborado pela autora (2020).

A população nos setores consolidados da cidade foi estimada para 2020 através de progressão geométrica. O crescimento médio da cidade foi de 13,14% e aplicando esse fator de crescimento nesses setores, foi obtido o valor de 228.012 habitantes, faltando, portanto, 8.060 moradores para completar a estimativa do IBGE para 2019, que é de 236.072 habitantes. Estes 8.060 habitantes foram alocados nos condomínios e loteamentos construídos e consolidados após 2010.

Esta alocação ocorreu em duas etapas. A primeira consistiu em contagem dos lotes inseridos dentro de cada um dos condomínios. A segunda, em uma estimativa visual de construção e ocupação. O mapa de lotes do município de Araraquara é apresentado na Figura 3. As imagens espaciais, apresentadas da Figura 4 à Figura 14, mostram a mudança na ocupação do solo entre 2012 e 2020 e através delas foi estimado o percentual de ocupação dos condomínios e loteamentos.

Figura 3 – Mapa de lotes de Araraquara - SP

Fonte: elaborado pela autora (2020).

Figura 4 – Residencial Dhama (ID 315) - imagem área: 2012 e 2020, respectivamente.



Fonte: elaborado pela autora, adaptado de Google Earth (2020).

Figura 5 – Condomínios diversos (ID 316) - imagem área: 2012 e 2020, respectivamente.



Fonte: elaborado pela autora, adaptado de Google Earth (2020).

Figura 6 – Condomínio Buona Vita Araraquara (ID 317) - imagem área: 2012 e 2020, respectivamente.



Fonte: elaborado pela autora, adaptado de Google Earth (2020).

Figura 7 – Residencial São Bento (ID 318) - imagem área: 2012 e 2020, respectivamente.



Fonte: elaborado pela autora, adaptado de Google Earth (2020).

Figura 8 – Condomínio Alto da Boa Vista (ID 320) - imagem área: 2012 e 2020, respectivamente.



Fonte: elaborado pela autora, adaptado de Google Earth (2020).

Figura 9 – Parque Residencial Jardim do Valle (ID 321) - imagem área: 2012 e 2020, respectivamente.



Fonte: elaborado pela autora, adaptado de Google Earth (2020).

Figura 10 – Quinta Do Salto Eco Residence (ID 322) - imagem área: 2012 e 2020, respectivamente.



Fonte: elaborado pela autora, adaptado de Google Earth (2020).

Figura 11 – Loteamento Zona Leste 1 (ID 323) - imagem área: 2012 e 2020, respectivamente.



Fonte: elaborado pela autora, adaptado de Google Earth (2020).

Figura 12 – Residencial Alamedas (ID 324) - imagem área: 2012 e 2020, respectivamente.



Fonte: elaborado pela autora, adaptado de Google Earth (2020).

Figura 13 – Loteamento Zona Leste 2 (ID325) - imagem área: 2012 e 2020, respectivamente.



Fonte: elaborado pela autora, adaptado de Google Earth (2020).

Figura 14 – Loteamento 3 localizado na Zona Leste - imagem área: 2012 e 2020, respectivamente.



Fonte: elaborado pela autora, adaptado de Google Earth (2020).

Dentre os setores considerados rurais em 2010, o setor 350320805000213 não está mapeado com novos loteamentos por Pierini (2020). A única alteração realizada no setor foi na área e perímetro. A estimativa populacional do setor foi realizada por progressão geométrica.

Possivelmente, o número de moradores desses novos condomínios e loteamentos é superior ao estimado. É provável que tenha ocorrido uma migração interna na cidade, com população saindo de setores consolidados para os novos, principalmente para a zona norte onde se localiza a feição 320. Entretanto, a precisão populacional só poderia ser atingida através de novo censo. Por fim, são apresentadas as estimativas adotadas para cada setor na Tabela 1.

Tabela 1 – Estimativa populacional para condomínios e loteamentos construídos após 2010 em Araraquara - SP

ID	Nome	Número de lotes	Estimativa visual de construção	Estimativa domicílios	% de novos domicílios	Estimativa população do setor em 2020
315	Residencial Dhama	1348	60%	809	12%	940
316	Condomínios diversos	835	65%	543	8%	631
317	Condomínio Buona Vita Araraquara	566	45%	255	4%	296
318	Residencial São Bento	835	90%	752	110%	873
320	Condomínio Alto da Boa Vista	396	60%	238	3%	276
321	Parque Res. Jardim do Valle	3327	100%	3327	48%	3865
322	Quinta Do Salto Eco Residence	617	40%	247	4%	287
323	Loteamento Zona Leste 1	100	90%	90	1%	105
324	Residencial Alamedas	815	50%	408	6%	473
325	Loteamento Zona Leste 2	228	100%	228	3%	265
326	Loteamento Zona Leste 3	430	10%	43	1%	50

Fonte: elaborado pela autora (2020).

APÊNDICE B – Zoneamento urbano de Araraquara - SP

De acordo com o plano diretor de Araraquara, o zoneamento da cidade é composto por ZAMB – Zonas Ambientais e ZEUS - Zonas de Estruturação Urbana Sustentável, cada uma com subdivisões com usos determinados (ARARAQUARA, 2014a).

As ZAMB – Zonas Ambientais objetivam orientar a preservação e proteção do meio ambiente, delimitam áreas de proteção e preservação ambiental, de restrição e controle à urbanização e de conservação e recuperação ambiental urbana. São subdivididas em:

- ZOPA - Zonas de Proteção Ambiental – zona com restrição e controle à urbanização;
- ZAUS - Zonas Ambientais de Uso Sustentável - zona com restrição e controle à urbanização;
- ZORA - Zona de Conservação e Recuperação Ambiental – zona com uso regulado, controlado e restrito de atividades residenciais de baixa densidade e chácaras de recreio.

As ZEUS - Zonas de Estruturação Urbana Sustentável objetivam orientar a política urbana, a aplicação e a gestão dos instrumentos urbanísticos previstos pelo Estatuto da Cidade, estimulando o processo de urbanização para uma cidade compacta com controle de densidades residenciais e o uso multifuncional do solo, além de promover novas acessibilidades e centralidades urbanas. São subdivididas em:

- ZOPRE - Zonas Predominantemente Residenciais
 - AEIU - Áreas Especiais de Interesse Urbanístico - uso predominantemente residencial, de média densidade;
 - APRM - Áreas de Proteção e Recuperação de Mananciais - uso predominantemente residencial, com controle de densidade;
 - ACOR – Áreas da Cidade de Ocupação Restrita - ocupação restrita em densidade e gabarito.
- ZOEMI - Zonas Especiais Mistas
 - ACOP - Área da Cidade Compacta de Ocupação Prioritária - Indução e consolidação do processo de urbanização, estimulando a edificabilidade do solo urbano e ocupação de imóveis urbanos ociosos, não utilizados ou subutilizados, segundo conceitos da cidade sustentável;

- ACITE - Área da Cidade de Transição e Expansão - Aplicação dos instrumentos urbanísticos previstos, bem como implementação de programas de dinamização urbana, com regulação e controle do processo de urbanização;
- AEIRA – Áreas Especiais de Interesse Ambiental de Contribuição do Aquífero - AEIS – Conjuntos Habitacionais de Interesse Social e Distritos Industriais;
- ACICH - Área Central de Interesse Cultural e Histórico - imóveis tombados pelo patrimônio histórico, com grande diversidade de uso, de ocupação consolidada, de média e alta densidade, e restrição de gabarito;
- ACICE - Área Central de Interesse Cultural e Econômico - grande diversidade de uso, de ocupação consolidada, de média e alta densidade, com incentivo de adensamento;
- ZEPP - Zonas Especiais Predominantemente Produtivas
 - ZOPI – Zona de Produção Industrial - Áreas industriais incômodas e incompatíveis, de média e alta interferência ambiental;
 - ZEPIS - Zona Especial de Produção Industrial Sustentável - Áreas industriais não incômodas, de baixa interferência ambiental, com classificação de empreendimentos de porte e atividades de uso equilibrado, sustentável e de impacto mitigável, compatível com uso misto;
 - ZOPAG – Zona de Produção Agrícola - Áreas de predominância do setor primário, de ocupação extensiva de baixa densidade
- CPE - Corredores de Produção Econômica
 - CPE 1 - Corredor de Produção Econômica 1 - Restrição de uso até Nível de Interferência Ambiental 2, e restrição de adensamento;
 - CPE 2 - Corredor de Produção Econômica 2 - Restrição de uso até Nível de Interferência Ambiental 2, e permissão de adensamento;
 - CPE 3 - Corredor de Produção Econômica 3 - Restrição de uso até Nível de Interferência Ambiental 3, e restrição de adensamento;
 - CPE 4 - Corredor de Produção Econômica 4 - Restrição de uso até Nível de Interferência Ambiental 3, e permissão de adensamento.
- ZORUR - Área Urbana, predominantemente agrária (ARARAQUARA, 2014a).

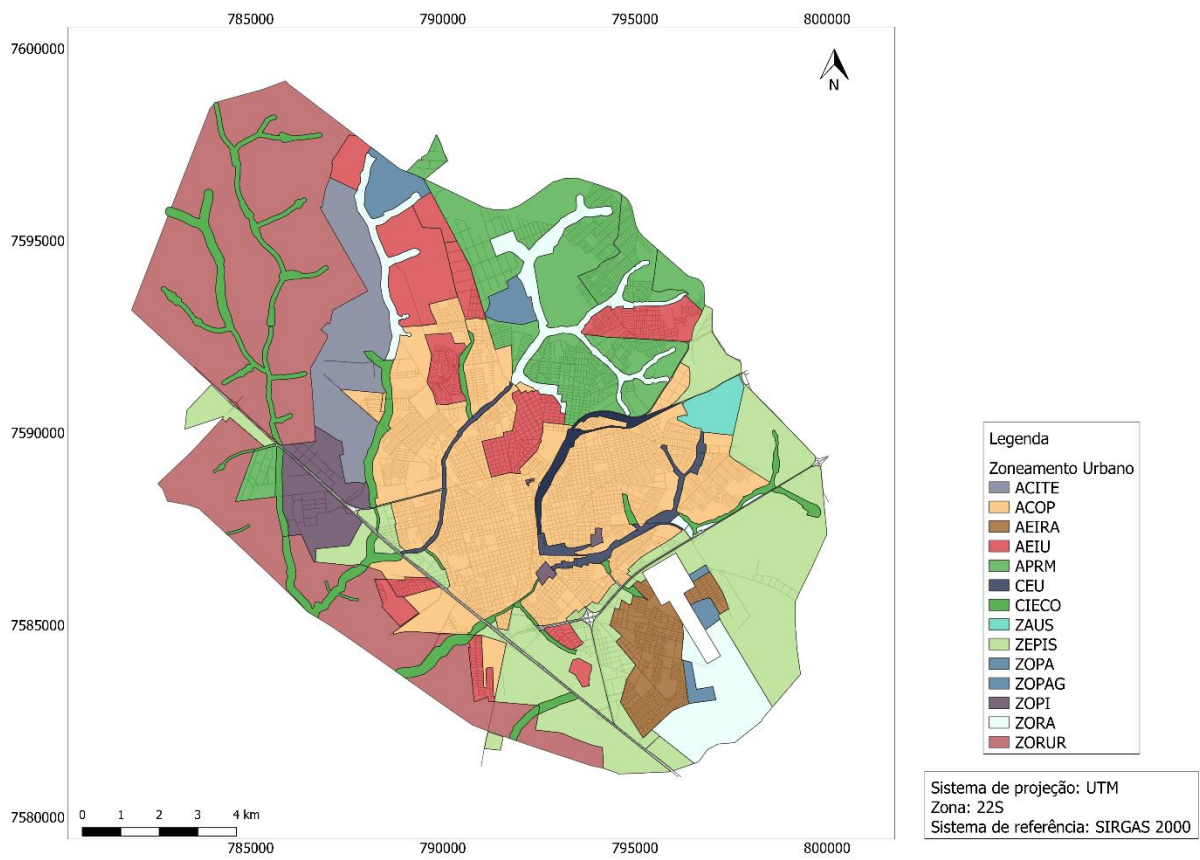
O Quadro 1 apresenta um resumo do índice de aproveitamento de cada zona, enquanto que a Figura 1 apresenta a delimitação espacial de cada uma. As zonas serão analisadas para

implantação de faixas exclusivas de ônibus de acordo com o Índice de Aproveitamento Máximo (IAM), sendo estes valores normalizados conforme descrito no item 4.1.1.

Quadro 1 – Índice de aproveitamento de acordo com o zoneamento urbano no Plano Diretor de Araraquara - SP

Categoria	Zoneamento		Índice de aproveitamento básico	Índice de aproveitamento máximo
ZAMB - Zonas Ambientais	ZOPA - Zonas de Proteção Ambiental		0,20	0,20
	ZAUS - Zonas Ambientais de Uso Sustentável		1,00	1,00
	ZORA - Zona de Conservação e Recuperação Ambiental		0,20	0,20
ZEUS - Zonas de Estruturação Urbana Sustentável	ZOPRE - Zonas Predominantemente Residenciais	AEIU - Áreas Especiais de Interesse Urbanístico	2,00	4,50
		APRM - Áreas de Proteção e Recuperação de Mananciais	1,50	2,50
		ACOR – Áreas da Cidade de Ocupação Restrita	1,50	3,00
	ZOEMI - Zonas Especiais Mistas	ACOP - Área da Cidade Compacta de Ocupação Prioritária	2,00	4,50
		ACITE - Área da Cidade de Transição e Expansão	2,00	3,00
		AEIRA – Áreas Especiais de Interesse Ambiental de Contribuição do Aquífero	1,50	2,50
		ACICH - Área Central de Interesse Cultural e Histórico	1,50	2,00
		ACICE - Área Central de Interesse Cultural e Econômico	2,00	4,50
	ZEPP - Zonas Especiais Predominantemente Produtivas	ZOPI – Zona de Produção Industrial	1,50	3,00
		ZEPIS - Zona Especial de Produção Industrial Sustentável	1,50	3,00
		ZOPAG – Zona de Produção Agrícola	1,50	3,00
	CPE - Corredores de Produção Econômica	CPE 1 - Corredor de Produção Econômica 1	2,00	3,00
		CPE 2 - Corredor de Produção Econômica 2	2,00	4,50
		CPE 3 - Corredor de Produção Econômica 3	2,00	3,00
		CPE 4 - Corredor de Produção Econômica 4	2,00	4,50

Fonte: elaborado pela autora, adaptado de Araraquara (2014a).

Figura 1 – Zoneamento urbano de Araraquara - SP

Fonte: elaborado pela autora, adaptado de Araraquara (2014a).

APÊNDICE C – Linhas de ônibus em operação em Araraquara - SP

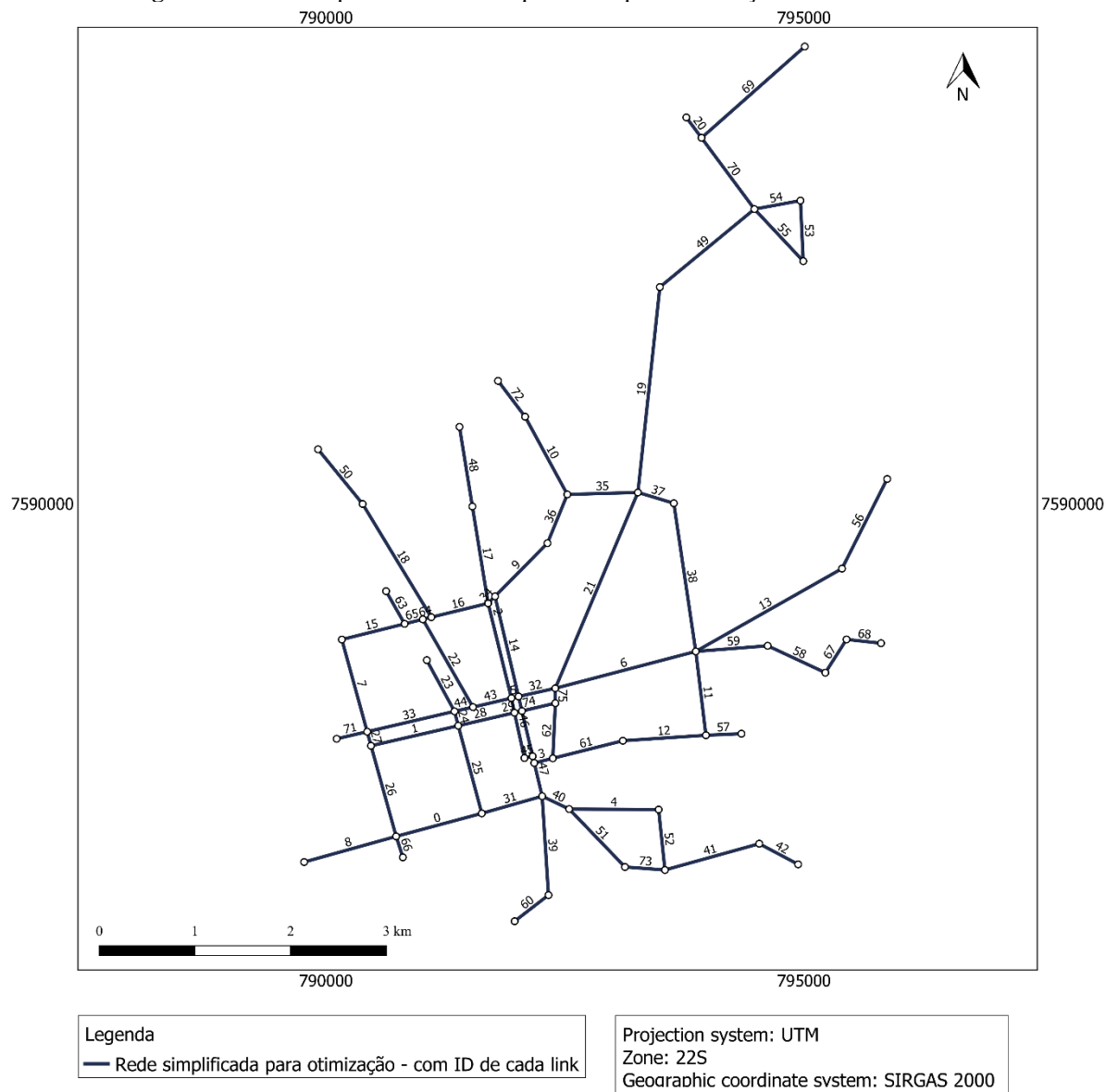
Quadro 1 – Linhas de ônibus em operação em Araraquara - SP

Nome	Empresa	Tipologia	Extensão total (km)	Realiza atendimento
América / Iguatemi	Empresa Cruz	Diametral	29,80	Sim
Assentamento Bela Vista	Viação Paraty	Radial	17,76	Não
Assentamento Monte Alegre	Viação Paraty	Radial	22,92	Não
Atacadão / TCI	Viação Paraty	Radial	9,63	Não
Biagioni / TCI	Empresa Cruz	Radial	18,74	Não
Bueno / TCI	Viação Paraty	Radial	36,53	Sim
Campus / Vila Xavier	Empresa Cruz	Diametral	22,70	Sim
Chácara Flora / TCI	Viação Paraty	Radial	25,21	Sim
Corujão Leste	Empresa Cruz	Circular	35,61	Sim
Corujão Norte	Viação Paraty	Circular	26,00	Sim
Corujão Oeste	Empresa Cruz	Circular	33,91	Sim
Corujão Sul	Viação Paraty	Circular	18,15	Sim
Distrito Industrial III / TCI	Empresa Cruz	Radial	22,14	Não
Dumont / TCI	Empresa Cruz	Radial	12,28	Sim
Expresso Campus	Empresa Cruz	Radial	15,68	Não
Expresso Maria Luiza	Empresa Cruz	Radial	17,78	Não
Expresso São Paulo	Empresa Cruz	Radial	12,02	Não
Expresso Pinheirinho	Empresa Cruz	Radial	6,10	Não
Fonte / Altos da Vila Xavier	Empresa Cruz	Circular	9,20	Sim
Fonte (Jd. das Estações - SESI) / TCI	Viação Paraty	Circular	12,03	Não
Fundação Casa / CR	Empresa Cruz	Radial	19,72	Sim
Gramado / Morumbi	Viação Paraty	Diametral	21,45	Não
Hortências / Águas do Paiol	Viação Paraty	Diametral	33,08	Não
Indaiá / Serra Azul / TCI	Viação Paraty	Radial	21,09	Sim
Indaiá / Terminal	Viação Paraty	Radial	21,76	Sim
Jardim Ieda / Centro	Viação Paraty	Radial	17,73	Não
Jardim Santa Lucia / Tamoio	Viação Paraty	Radial	11,59	Não
Maria Luiza / Vitória De Santi	Empresa Cruz	Diametral	37,00	Não
Melhado / Imperador	Viação Paraty	Diametral	22,51	Não
Rafaela / Oitis / TCI	Empresa Cruz	Radial	10,89	Sim
Rodorib / TCI (Shopping Jaraguá)	Viação Paraty	Radial	24,70	Sim
Sachs / Cervejaria / Atacadão	Empresa Cruz	Radial	7,90	Sim
Santana / Pinheirinho	Empresa Cruz	Diametral	17,59	Não
São José / Santa Angelina	Empresa Cruz	Diametral	22,59	Não
Selmi-Dei / Yolanda Ópice	Viação Paraty	Diametral	34,26	Sim
Universal / Cecap	Viação Paraty	Diametral	28,20	Não
Vale do Sol / Pq. São Paulo	Viação Paraty	Diametral	30,70	Sim
Valle Verde / Centro (Via Roxo)	Viação Paraty	Radial	23,48	Sim

Fonte: elaborado pela autora (2020).

APÊNDICE D – Rede para otimização de Araraquara - SP

Figura 1 – Rede simplificada de Araraquara - SP para otimização com ID de cada *link*



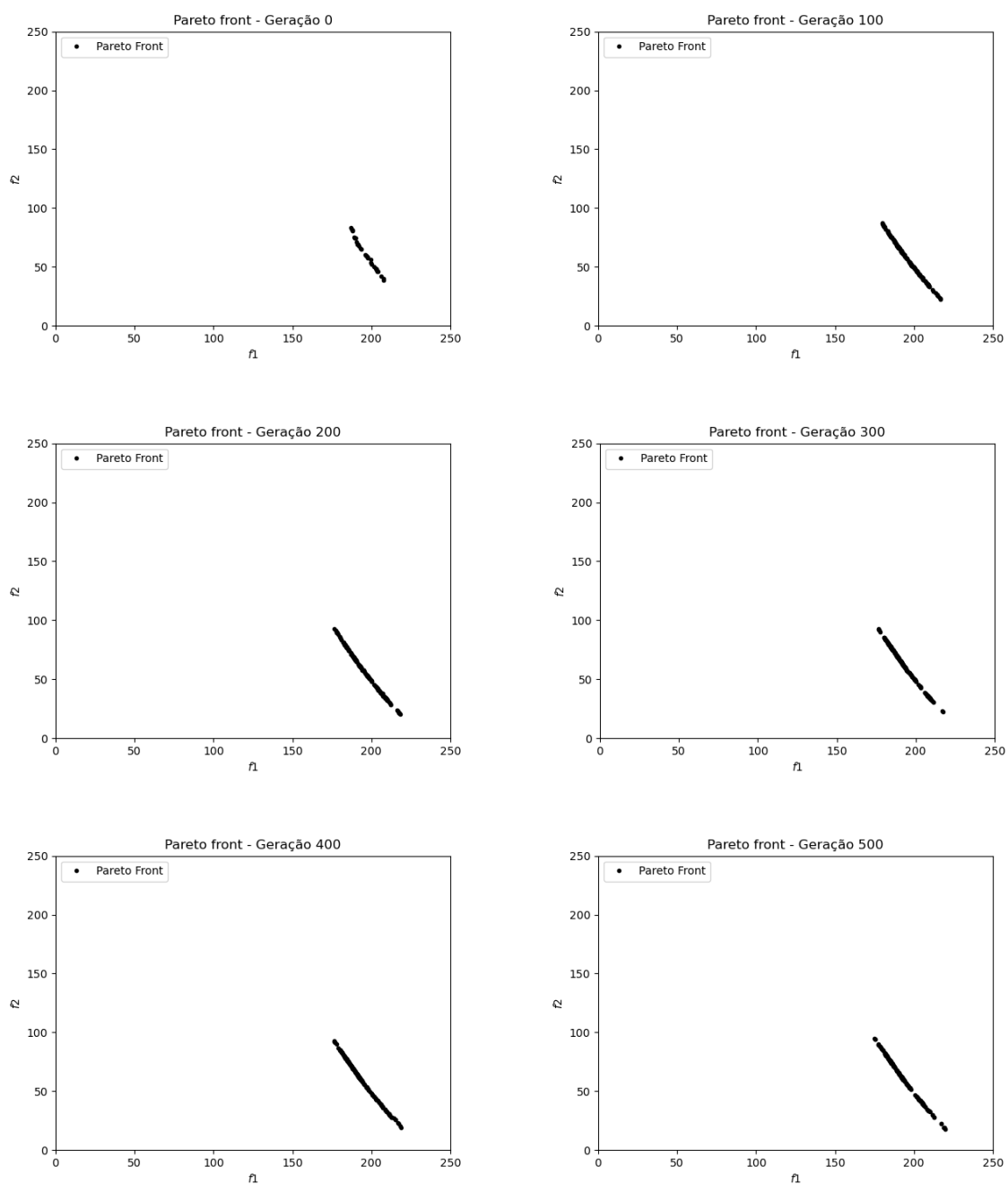
Fonte: elaborado pela autora (2021).

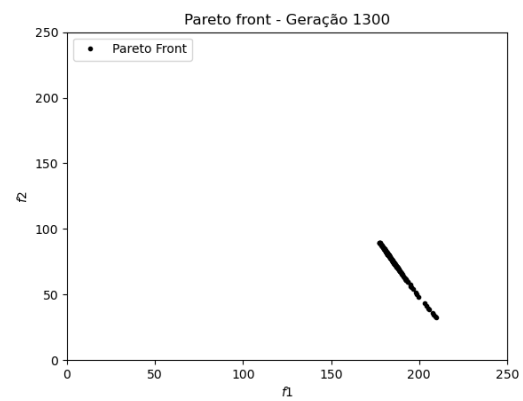
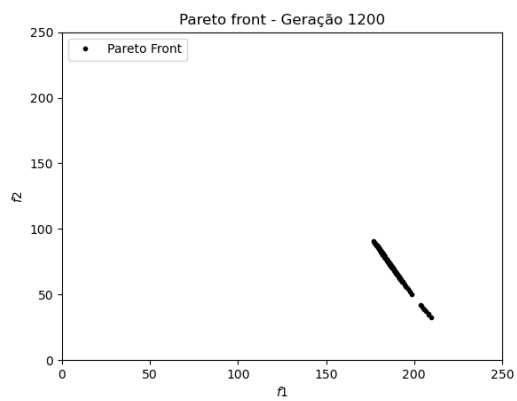
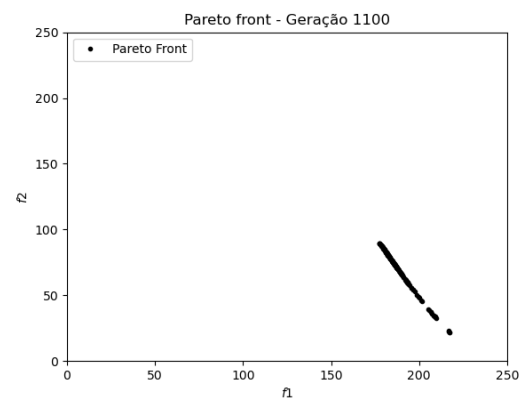
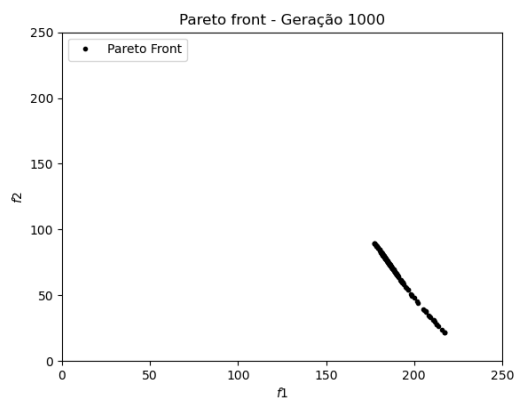
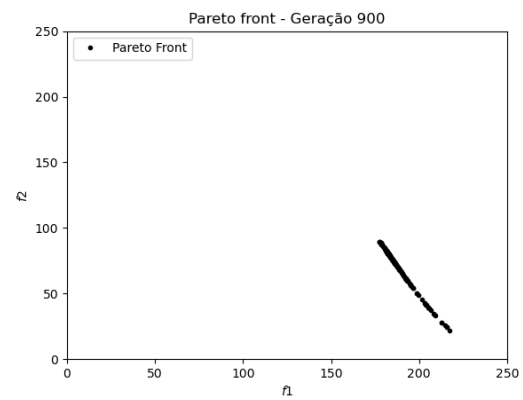
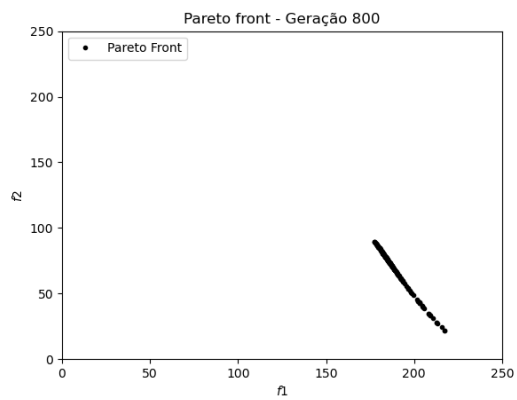
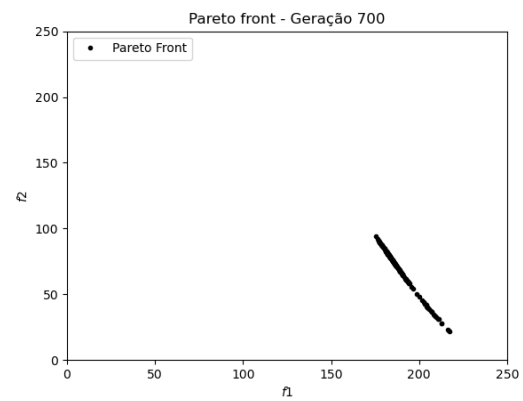
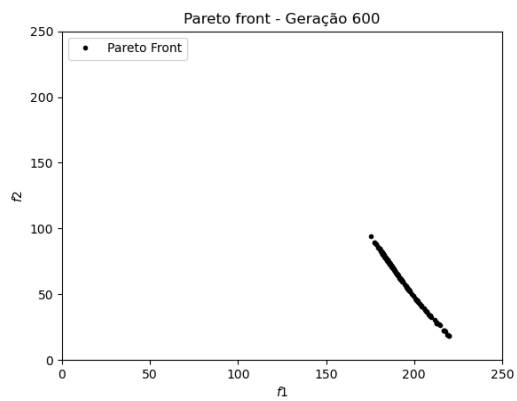
Tabela 1 – Caracterização da rede de otimização

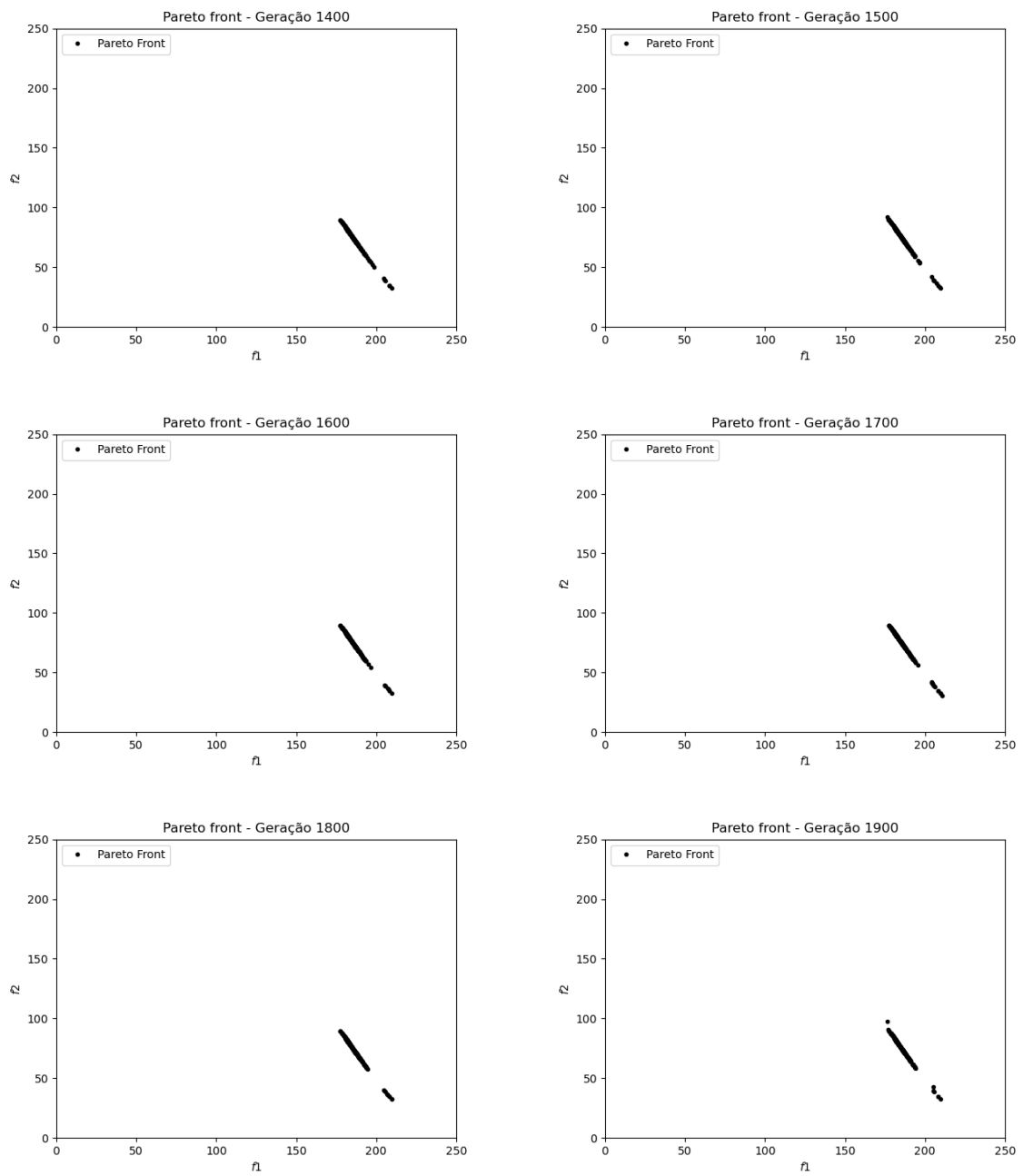
ID	Logradouro	Pontuação AHP	Distância (em km)	Hierarquia viária	Fluxo de ônibus Pico-Manhã (ônibus / hora)
0	Sete de Setembro	0,429	0,927	Arterial	9
1	Jose Bonifácio	0,527	0,936	Coletora Projetada	15
2	Sao Bento	0,625	1,021	Coletora Projetada	53
3	Santo Antonio	0,429	0,200	Coletora	17
4	Padre Manoel Nobrega	0,429	0,935	Arterial	8
5	Barroso	0,331	0,077	Coletora Projetada	24
6	Padre Antonio Cezarino	0,527	1,518	Coletora	13
7	Castro Alves	0,429	1,000	Arterial	10
8	Presidente Vargas	0,429	0,999	Coletora Projetada	9
9	Bento de Abreu	0,527	0,781	Arterial	43
10	Napoleao Selmi Dei	0,527	0,925	Arterial	37
11	Paulista	0,429	0,883	Arterial	14
12	Joao Batista de Oliveira	0,429	0,871	Arterial Adequacao	9
13	Francisco Vaz Filho	0,429	1,757	Arterial Adequacao	10
14	9 de Julho	0,625	1,076	Coletora Projetada	57
15	Padre Francisco Colturato	0,527	0,676	Arterial Adequacao	20
16	Padre Francisco Colturato	0,429	0,611	Arterial Adequacao	20
17	9 de Julho	0,527	1,027	Coletora Projetada	57
18	Armando de Salles Oliveira	0,527	1,384	Coletora Projetada	12
19	Mauricio Galli	0,527	2,160	Arterial	25
20	Picasso	0,429	0,266	Arterial Adequacao	9
21	Maria Antonia Camargo de Oliveira	0,527	2,223	Arterial	12
22	Carlos Gomes	0,429	1,057	Local	11
23	Expedicionarios do Brasil	0,429	0,608	Coletora Projetada	10
24	Expedicionarios do Brasil	0,429	0,156	Coletora Projetada	10
25	Expedicionarios do Brasil	0,527	0,949	Coletora Projetada	10
26	Castro Alves	0,527	0,983	Arterial	10
27	Castro Alves	0,429	0,153	Arterial	10
28	Jose Bonifácio	0,429	0,503	Coletora Projetada	15
29	Jose Bonifácio	0,429	0,100	Coletora Projetada	15
30	Jose Bonifácio	0,429	0,080	Coletora Projetada	15
31	Sete de Setembro	0,527	0,656	Arterial	9
32	Barroso	0,429	0,394	Coletora Projetada	24
33	Barroso	0,429	0,937	Coletora Projetada	24
34	Bento de Abreu	0,527	0,103	Arterial	43
35	Luiz Alberto	0,527	0,738	Local	20
36	Napoleao Selmi Dei	0,625	0,550	Arterial	37
37	Paulista	0,429	0,392	Arterial	14
38	Paulista	0,527	1,566	Arterial	14
39	Maria Antonia Camargo de Oliveira	0,527	1,036	Arterial	12
40	Padre José de Anchieta	0,527	0,313	Perimetral Projetada	22
41	Alberto Santos Dumont	0,527	1,024	Coletora Funcional	20
42	Alberto Santos Dumont	0,527	0,460	Coletora Funcional	20
43	Barroso	0,625	0,412	Coletora Projetada	24
44	Barroso	0,527	0,198	Coletora Projetada	24
45	Portugal	0,429	0,088	Local	57

ID	Logradouro	Pontuação AHP	Distância (em km)	Hierarquia viária	Fluxo de ônibus Pico-Manhã (ônibus / hora)
46	Sao Bento	0,429	0,641	Coletora Projetada	53
47	9 de Julho	0,429	1,072	Coletora Projetada	57
48	9 de Julho	0,723	0,850	Coletora Projetada	57
49	Mauricio Galli	0,429	1,281	Arterial	25
50	Armando de Salles Oliveira	0,429	0,738	Coletora Projetada	12
51	Padre José de Anchieta	0,100	0,841	Perimetral Projetada	22
52	Matheus de Nobile	0,100	0,635	Local	8
53	Edson Baccarin (Dr.)	0,429	0,634	Coletora Funcional	10
54	Mauricio Galli	0,625	0,489	Arterial	25
55	Pablo Picasso	0,429	0,746	Arterial Adequacao	9
56	Francisco Vaz Filho	0,429	1,050	Arterial Adequacao	10
57	Joao Batista de Oliveira	0,429	0,372	Arterial Adequacao	9
58	Joaquim Vieira dos Santos	0,527	0,665	Coletora	12
59	Joaquim Vieira dos Santos	0,429	0,754	Coletora	12
60	Maria Antonia Camargo de Oliveira	0,527	0,448	Arterial	12
61	Santo Antonio	0,429	0,755	Coletora	17
62	Maria Antonia Camargo de Oliveira	0,527	0,577	Arterial	0
63	Expedicionários do Brasil	0,527	0,393	Coletora Projetada	10
64	Padre Francisco Colturato	0,625	0,091	Arterial Adequacao	20
65	Padre Francisco Colturato	0,625	0,196	Arterial Adequacao	20
66	Castro Alves	0,429	0,230	Arterial	10
67	São Jose do Rio Preto	0,100	0,412	Local	6
68	America	0,429	0,363	Coletora Funcional	6
69	Dr. Jose Logatti	0,429	1,441	Arterial Adequacao	8
70	Picasso	0,429	0,928	Arterial Adequacao	9
71	Barroso	0,429	0,328	Coletora Projetada	24
72	Napoleao Selmi Dei	0,527	0,469	Arterial	37
73	Alberto Santos Dumont	0,429	0,419	Coletora Funcional	20
74	Jose Bonifácio	0,331	0,359	Coletora Projetada	0
75	Maria Antonia Camargo de Oliveira	0,429	0,155	Arterial	12

Fonte: elaborado pela autora (2021).

APÊNDICE E – Fronteiras de Pareto do método otimização da rede de Araraquara - SP**Figura 1** – Fronteiras de Pareto obtidas no método de otimização da rede de Araraquara - SP





Fonte: elaborado pela autora (2021).